

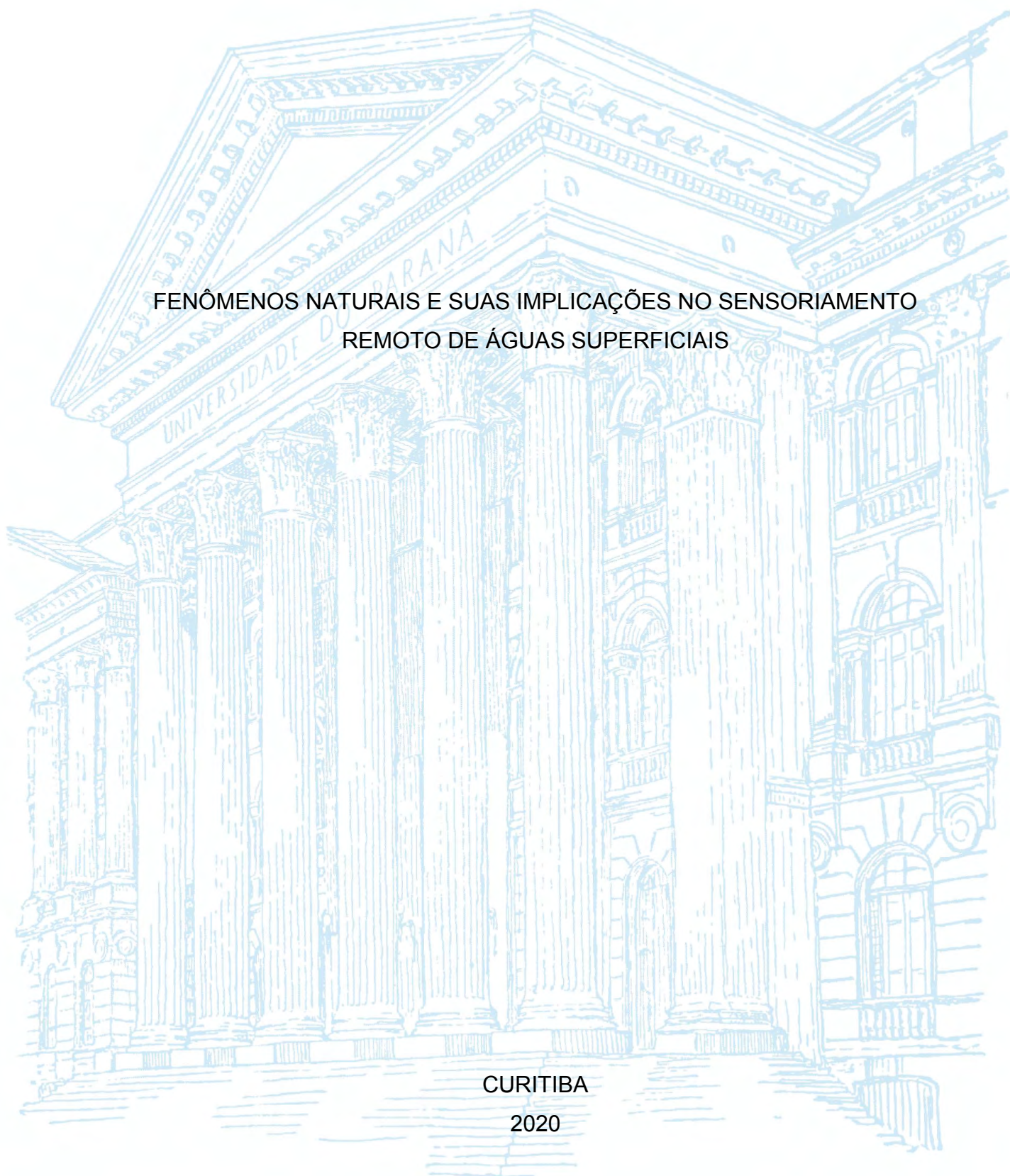
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE REISDORFER LEITE

FENÔMENOS NATURAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SENSORIAMENTO  
REMOTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

CURITIBA

2020



HENRIQUE REISDORFER LEITE

FENÔMENOS NATURAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SENSORIAMENTO  
REMOTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, linha de pesquisa de Paisagem e Análise Espacial, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Antonio de Oliveira.

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

L533f    Leite, Henrique Reisdorfer  
Fenômenos naturais e suas implicações no sensoriamento remoto de águas superficiais [recurso eletrônico] / Henrique Reisdorfer Leite. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2020.

Orientador: Fabiano Antonio de Oliveira.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Radiação - Transferência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Fabiano Antonio de. III. Título.

CDD: 536.3

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

**ATA Nº587**

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM GEOGRAFIA**

No dia quatro de novembro de dois mil e vinte às 14:00 horas, na sala por meio de videoconferência- <https://bit.ly/3m9yej7>, Edifício João José Bigarella, 1º andar - Jardim das Américas - Centro Politécnico, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação do mestrando **HENRIQUE REISDORFER LEITE**, intitulada: **FENÔMENOS NATURAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS.**, sob orientação do Prof. Dr. FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), FELIPE DE LUCIA LOBO (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS), CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela **APROVAÇÃO**. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

Observações: Esta banca ocorreu de forma remota com base na Portaria nº 36/2020 da CAPES de 19/03/2020.

CURITIBA, 04 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 17:18:57.0

FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 20:15:52.0

TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 17:07:37.0

FELIPE DE LUCIA LOBO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS)

Assinatura Eletrônica

05/11/2020 10:30:28.0

CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **HENRIQUE REISDORFER LEITE** intitulada: **FENÔMENOS NATURAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS.**, sob orientação do Prof. Dr. FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 04 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 17:18:57.0

FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 20:15:52.0

TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/11/2020 17:07:37.0

FELIPE DE LUCIA LOBO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS)

Assinatura Eletrônica

05/11/2020 10:30:28.0

CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho em especial ao meu Pai e a minha família, além de todos que me ajudaram nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento especial primeiro a minha mãe Regina, meus irmãos Vinícius e Bernardo, e minha cunhada Lidiane que me encorajaram e me ajudaram nessa jornada. Ao meu orientador Fabiano por ter aceitado meu convite e ter me auxiliado todo esse tempo. Desejo igualmente agradecer a Gheysa por ter me dado essa oportunidade de mestrado, além de todos no LACTEC que caminharam comigo durante esses dois anos. A todos os meus amigos e o resto da família que estiveram comigo nos momentos de descontração, além dos membros da banca por terem aceitado o convite e ajudarem a melhorar o trabalho. Não menos importante, a todos os pesquisadores que tive contato em simpósios e conferências.

## RESUMO

A alteração na irradiância da radiação captada pelos sensores orbitais, ocasionada pelas características inerentes aos corpos d'água e da atmosfera é um obstáculo considerável para a acurácia das informações extraídas a partir desses dados. Essa dissertação teve como objetivo analisar os fenômenos que podem comprometer as informações orbitais obtidas pelo sensor orbital passivo MSI da missão Sentinel-2 sobre um corpo d'água, através de um estudo de caso sobre o reservatório de Jupiá localizado no rio Paraná, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Foi criada uma base de dados de reflectância dos diversos fenômenos identificados, através da coleta de amostras numa série histórica de imagens sobre o reservatório. Os fenômenos foram todos analisados separadamente a partir das suas distribuições, e a base de dados foi comparada com imagens diferentes. Além disso, foi testado o quanto os fenômenos mais relevantes podem afetar a correção atmosférica e os resultados de algoritmos bio-óticos. Foi identificado que o brilho do Sol, o vapor na atmosfera, as macrófitas aquáticas na água e as sombras de nuvens são os fenômenos que alteram de forma mais significativa os valores de reflectância das águas claras. Os resultados mostram as diferenças inerentes a cada algoritmo, remontando às aproximações diferentes utilizadas nas correções atmosféricas e extração das propriedades inerentes/aparentes da água.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Transferência de Radiação. Modelos bio-óticos. Correção Atmosférica. Base de dados Espectral.



## **ABSTRACT**

The change in the irradiance of the radiation captured by orbital sensors, caused by the characteristics inherent to water bodies and the atmosphere is a considerable obstacle to the accuracy of the information extracted from these data. This dissertation aimed to analyze the phenomena that may compromise the orbital information obtained by the passive orbital sensor MSI aboard the Sentinel-2 mission on a water body, through a case study on the Jupia reservoir located on the Paraná River, between the states of São Paulo and Mato Grosso do Sul. A reflectance database was created for every identified phenomenon, through the collection of samples in a historical series of images containing the reservoir. The phenomena were all analyzed separately for their distributions, and the database was compared with separate images. In addition, it was tested how much the most relevant phenomena can affect different atmospheric correction and bio-optical algorithms. It was identified that the sunglint effect, vapor in the atmosphere, aquatic macrophytes in the water and cloud shadows are the phenomena that most significantly alter the reflectance values of clear water.

**Keywords:** Remote Sensing. Radiative Transfer. Bio-optical models. Atmospheric correction.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	18
FIGURA 2 – PRESENÇA DE MACRÓFITAS SUBMERSAS COM FLORAÇÕES NO NÍVEL DA ÁGUA.....	18
FIGURA 3 – DIFERENÇAS ÓTICAS ENTRE OS COMPONENTES DO RESERVATÓRIO.....	20
FIGURA 4 – ESPECIFICIDADES DOS SENSORES .....	23
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA RADIAÇÃO SOLAR .....	24
FIGURA 6 – MAPA DE PROF. ÓTICA DOS AEROSSÓIS SOBRE O RESERVATÓRIO E DOS ÂNGULOS DE VISADA .....	27
FIGURA 7 – COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR QUANDO INCIDENTE SOBRE A ÁGUA.....	28
FIGURA 8 – DIFERENÇA DA MESMA IMAGEM COM E SEM A CORREÇÃO DE ADJACÊNCIA, USANDO O MESMO INTERVALO NO HISTOGRAMA .....	29
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO – PRIMEIRO OBJETIVO .....	32
FIGURA 10 – CENAS DO SENTINEL-2 SOBRE A ÁREA DE ESTUDO .....	33
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM PARA OS FENÔMENOS DE NATUREZA ESTÁTICA .....	35
FIGURA 12 – ALTA PRESENÇA DE MACRÓFITAS NO BRAÇO DO RIO TIETÊ ...	36
FIGURA 13 – EXEMPLO DAS DIFERENTES ESPESSURAS DE VAPOR NA ATMOSFERA.....	37
FIGURA 14 – BRILHO DO SOL NO RESERVATÓRIO .....	38
FIGURA 15 – VAPOR SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS .....	39
FIGURA 16 – BRILHO DO SOL E VAPOR SOBRE A ÁGUA .....	39
FIGURA 17 – VAPOR, BRILHO DO SOL E MACRÓFITAS AQUÁTICAS .....	40
FIGURA 18 – SOMBRAS DE NUVENS SOBRE O RESERVATÓRIO .....	41
FIGURA 19 – FLUXOGRMA DE TRABALHO – ETAPA 1 DO OBJETIVO 2 .....	42
FIGURA 20 – FLUXOGRMA DE TRABALHO – ETAPA 2 DO OBJETIVO 2 .....	43
FIGURA 21 – ÁREAS COM MACRÓFITAS SEM BRILHO ACIMA.....	61
FIGURA 22 – BRILHO APENAS SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS.....	62
FIGURA 23 – CASO EXTREMO DE BRILHO DO SOL NO RESERVATÓRIO.....	69

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – TRANSMITÂNCIA DA ATMOSFERA.....	26
GRÁFICO 2 – CURVAS DE TRANSMITÂNCIA DA CAMADA DE OZÔNIO PARA VISADA EM NADIR .....	27
GRÁFICO 3 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA – ÁGUAS CLARAS (TODAS AS ÁREAS) .....	48
GRÁFICO 4 – DIFERENÇAS DE REFLECTÂNCIA EM DOIS CASOS DIFERENTES DE CLARIDADE DA ÁGUA.....	49
GRÁFICO 5 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO PARANÁ – ÁGUAS CLARAS..	49
GRÁFICO 6 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO TIETÊ – ÁGUAS CLARAS .....	50
GRÁFICO 7 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO SUCURIÚ – ÁGUAS CLARAS	50
GRÁFICO 8 – CURVAS ESPECTRAIS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS .....	52
GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS MACRÓFITAS SUBMERSAS .....	53
GRÁFICO 10 – CURVAS ESPECTRAIS DE MACRÓFITAS POR PROFUNDIDADE .....	54
GRÁFICO 11 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS ÁGUAS OTICAMENTE RASAS .....	55
GRÁFICO 12 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS MACRÓFITAS FLUTUANTES E/OU EMERGENTES .....	56
GRÁFICO 13 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE VAPOR NA ATMOSFERA PARA TODAS AS INTENSIDADES.....	57
GRÁFICO 14 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DO BRILHO DO SOL.....	58
GRÁFICO 15 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE VAPOR SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS.....	59
GRÁFICO 16 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DO VAPOR ACIMA DO BRILHO DO SOL NA ÁGUA .....	60
GRÁFICO 17 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE BRILHO ACIMA DE ÁREAS COM MACRÓFITAS SUBMERSAS .....	61
GRÁFICO 18 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE BRILHO DO SOL, VAPOR E MACRÓFITAS.....	63

GRÁFICO 19 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS SOMBRAS DE NUVENS SOBRE A ÁGUA .....	64
GRÁFICO 20 – COMPARAÇÃO – SUPERFÍCIE DA ÁGUA EM IMAGENS ‘LIMPAS’ .....	66
GRÁFICO 21 – COMPARAÇÃO – VAPOR.....	67
GRÁFICO 22 – COMPARAÇÃO – BRILHO DO SOL .....	68
GRÁFICO 23 – COMPARAÇÃO – BRILHO DO SOL E VAPOR NA ATMOFERA....	70
GRÁFICO 24 – COMPARAÇÃO – SOMBRAS DE NUVENS.....	72
GRÁFICO 25 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS ÁGUAS CLARAS .....	73
GRÁFICO 26 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS ÁGUAS CLARAS, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA.....	74
GRÁFICO 27 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR .....	76
GRÁFICO 28 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA .....	76
GRÁFICO 29 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O BRILHO.....	78
GRÁFICO 30 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O BRILHO, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA .....	78
GRÁFICO 31 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR E O BRILHO .....	80
GRÁFICO 32 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR E O BRILHO, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA..	80
GRÁFICO 33 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA SOMBRAS DE NUVENS .....	82
GRÁFICO 34 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS SOMBRAS DE NUVENS, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA .....	82
GRÁFICO 35 – COMPARAÇÃO – REFLECTÂNCIAS BOA DAS ÁGUAS CLARAS E SOMBRAS DE NUVENS .....	83
GRÁFICO 36 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO KD(490).....	85

GRÁFICO 37 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO ACOLITE E MIP (KD(490)) .....	85
GRÁFICO 38 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO KD(490).....	86
GRÁFICO 39 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO KD(490) .....	87
GRÁFICO 40 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO KD(490) ...	87
GRÁFICO 41 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO KD(490).....	88
GRÁFICO 42 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO SST .....	90
GRÁFICO 43 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO ACOLITE E MIP (SST).....	90
GRÁFICO 44 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O VAPOR – PARÂMETRO SST .....	91
GRÁFICO 45 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO SST.....	91
GRÁFICO 46 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST – SEM ZOOM .....	92
GRÁFICO 47 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST.....	93
GRÁFICO 48 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST – SEM ZOOM .....	93
GRÁFICO 49 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO SST .....	94
GRÁFICO 50 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO TURBIDEZ ..	95
GRÁFICO 51 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO TURBIDEZ .....	96

GRÁFICO 52 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM .....	96
GRÁFICO 53 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ.....	97
GRÁFICO 54 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM .....	98
GRÁFICO 55 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ .....	99
GRÁFICO 56 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM.....	99
GRÁFICO 57 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO TURBIDEZ .....	100
GRÁFICO 58 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM.....	101
GRÁFICO 59 – DISPERSÃO ENTRE TURBIDEZ E OS VALORES DE REFLECTÂNCIA DA BANDA 10 PARA OS PONTOS COM SOMBRAS DE NUVENS .....	101
GRÁFICO 60 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO CLOROFILA- A.....	102
GRÁFICO 61 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO C2RCC E MIP (CLOROFILA-A).....	103
GRÁFICO 62 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO CLOROFILA-A .....	103
GRÁFICO 63 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO CLOROFILA-A....	104

GRÁFICO 64 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO CLOROFILA-A .....	105
GRÁFICO 65 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO CLOROFILA-A .....	105

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS .....	47
TABELA 2 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO KD(490) .....	84
TABELA 3 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO SST.....	89
TABELA 4 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO TURBIDEZ .....	95
TABELA 5 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO CLOROFILA-A .....	102



## LISTA DE SIGLAS

<i>a</i>	- Coeficiente de absorção da radiação
<i>a<sub>det</sub></i>	- Coeficiente de absorção de detritos/material particulado
<i>a<sub>g</sub></i>	- Coeficiente de absorção de matéria orgânica colorada ( <i>gelbstoff</i> )
AOP	- <i>Apparent Optical Properties</i>
AOT	- <i>Aerosol Optical Thickness</i>
API	- <i>Application Programming Interface</i>
<i>a<sub>pig</sub></i>	- Coeficiente de absorção de pigmentos fotossintéticos
<i>b</i>	- Coeficiente de difusão da radiação
<i>b<sub>b</sub></i>	- Coeficiente de retrodifusão
<i>b<sub>bp</sub></i>	- Coeficiente de retrodifusão de material particulado
<i>b<sub>bpig</sub></i>	- Coeficiente de retrodifusão de pigmentos fotossintéticos
BOA	- <i>Bottom of Atmosphere</i>
<i>c</i>	- Coeficiente de Atenuação Espectral do Feixe
ESA	- <i>European Space Agency</i>
IOCCG	- <i>International Ocean-Colour Coordinating Group</i>
IOP	- <i>Inherent Optical Properties</i>
IR	- <i>InfraRed</i>
<i>K<sub>d</sub>(λ)</i>	- Coeficiente de Atenuação Difusa para Irradiância Descendente (para determinado λ)
MIP	- <i>Modular Inversion Program</i>
NIR	- <i>Near infra-red</i>
p10	- Percentil 10
p90	- Percentil 90
R	- Reflectância da irradiância
R <sub>rs</sub>	- Reflectância do sensoriamento remoto
RTE	- <i>Radiation Transfer Equation</i>
R <sub>w</sub>	- Reflectância da irradiância de água 'pura'
S2A	- Satélite Sentinel 2A
S2B	- Satélite Sentinel 2B
SST	- Sólidos Suspensos Totais
SWIR	- <i>Short wave infra-red</i>
TILE_ID	- <i>Tile Identification</i>

TOA      - *Top of Atmosphere*  
 $\lambda$         - Comprimento de onda

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 ÁREA DE ESTUDO.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	21
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.3.1 Objetivo geral .....	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1 INTERAÇÃO ENTRE A ENERGIA SOLAR, O SENSOR, A ATMOSFERA E A ÁGUA .....	22
2.1.1 Sensor .....	23
2.1.2 Atmosfera .....	24
2.1.3 Água .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1 PRIMEIRO OBJETIVO .....	32
3.1.1 Download de série histórica .....	32
3.1.2 Critério de seleção, classificação e separação das imagens .....	33
3.1.3 Criação dos pontos de amostragem e extração de valores .....	34
3.1.3.1 Águas claras.....	34
3.1.3.2 Fenômenos de natureza 'estática' .....	35
3.1.3.3 Outros fenômenos .....	37
3.1.4 Organização .....	41
3.1.5 Comparação.....	41
3.2 SEGUNDO OBJETIVO.....	42
3.2.1 Primeiro teste – comparação das reflectâncias BOA e TOA.....	45
3.2.2 Segundo teste – Linha de base e comparação .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1 BASE DE DADOS .....	47
4.1.1 Imagens.....	47
4.1.2 Resultados: Águas claras.....	48
4.1.3 Resultados: Imagens com fenômenos estáticos detectados.....	52
4.1.3.1 Macrófitas Submersas .....	53
4.1.3.2 Águas óticamente rasas .....	55
4.1.3.3 Macrófitas flutuantes/emergentes.....	56

4.1.4 Resultados: Fenômenos de natureza não estática .....	56
4.1.4.1 Vapor na atmosfera .....	57
4.1.4.2 Brilho do Sol na superfície da água .....	57
4.1.4.3 Vapor na atmosfera e macrófitas .....	58
4.1.4.4 Vapor na atmosfera e brilho do Sol .....	59
4.1.4.5 Brilho do Sol e macrófitas submersas .....	60
4.1.4.6 Vapor na atmosfera, brilho do Sol e macrófitas .....	63
4.1.4.7 Sombras de nuvens .....	64
4.1.5 Comparação .....	65
4.1.5.1 Águas claras .....	66
4.1.5.2 Vapor na atmosfera .....	67
4.1.5.3 Brilho do Sol .....	68
4.1.5.4 Brilho do Sol e vapor na atmosfera .....	70
4.1.5.5 Sombras de Nuvens .....	71
4.2 IMPLICAÇÕES EM ALGORITMOS .....	72
4.2.1 Primeiro teste – comparação das reflectâncias TOA e BOA .....	73
4.2.1.1 Águas claras .....	73
4.2.1.2 Vapor na atmosfera .....	76
4.2.1.3 Brilho do Sol .....	77
4.2.1.4 Brilho do Sol e vapor na atmosfera .....	80
4.2.1.5 Sombras de nuvens .....	81
4.2.2 Segundo teste – comparação com os algoritmos bio-óticos .....	84
4.2.2.1 Parâmetro $K_d(490)$ .....	84
4.2.2.2 Parâmetro Sólidos Suspensos Totais .....	89
4.2.2.3 Parâmetro Turbidez .....	95
4.2.2.4 Parâmetro Clorofila-a .....	102
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>106</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	107
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A alteração na irradiância da radiação captada pelos sensores orbitais, ocasionada pelas características inerentes aos corpos d'água e da atmosfera, é um obstáculo considerável para a acuracidade das informações extraídas a partir desses dados.

Conforme os avanços recentes nas tecnologias de compartilhamento de dados e *hardware*, Doxani et al. (2018) explicam:

“Hoje em dia, políticas de dados abertos e gratuitos permite acesso a uma grande quantidade de dados de sensoriamento remoto os quais, juntos com tecnologias avançadas de hardwares, facilitam significativamente a análise de longas séries temporais. A correção dos impactos atmosféricos nas observações óticas é um passo inicial fundamental para qualquer análise quantitativa que necessita de dados consistentes da Reflectância da Superfície.” (Doxani et al., 2018, p.2).

A problemática do sensoriamento remoto orbital passivo sobre corpos d'água envolve suas diversas características físicas inerentes e de fenômenos atmosféricos que ficam entre o sensor e os corpos d'água. Esse trabalho foi feito levando esses efeitos em consideração, partindo do pressuposto que cada pixel da imagem é composto pelos elementos “horizontais” (objetos generalizados pela resolução espacial) e “verticais” (objetos na superfície e a atmosfera), ou seja, os píxeis são uma representação bidimensional de várias características tridimensionais.

De forma geral, os algoritmos de correção atmosférica são baseados na resolução da Equação de Transferência de Radiação (RTE na sigla em inglês) (Vermote et al., 2006; Richter, Louis & Müller-Wilm, 2012; Vanhellemont & Ruddick, 2018; Hagolle, Huc, Desjardins, Auer, & Richter, 2017; Doerffer & Schiller, 2008). Entretanto, a atmosfera não é o único fator a ser levado em consideração quando se trata de corpos d'água (IOCCG, 2020), por ser um meio transmissivo da radiação eletromagnética (luz solar, no caso de sensoriamento remoto orbital passivo). A combinação entre métodos de correção atmosférica e modelagem da radiação eletromagnética dentro do meio aquático é essencial para os estudos realizados sobre ele a partir de imagens orbitais.

Entretanto, uma performance considerada aceitável em correção atmosférica sobre terra pode não ser uma premissa válida para imagens sobre corpos d'água. Os exemplos atuais mais proeminentes de dados gratuitos de dados orbitais são: A missão Landsat-8 (NASA e Serviço Geológico dos Estados Unidos; USGS) e as missões Sentinel da Agência Espacial Europeia (ESA). A missão Sentinel-2 foi a escolhida para a realização do trabalho devido suas resoluções espectral, temporal e espacial maiores que a da missão Landsat-8. A missão Sentinel-3 tem uma qualidade radiométrica e espectral maior, entretanto sua resolução espacial é baixa (~300m), não adequado para a área de estudo.

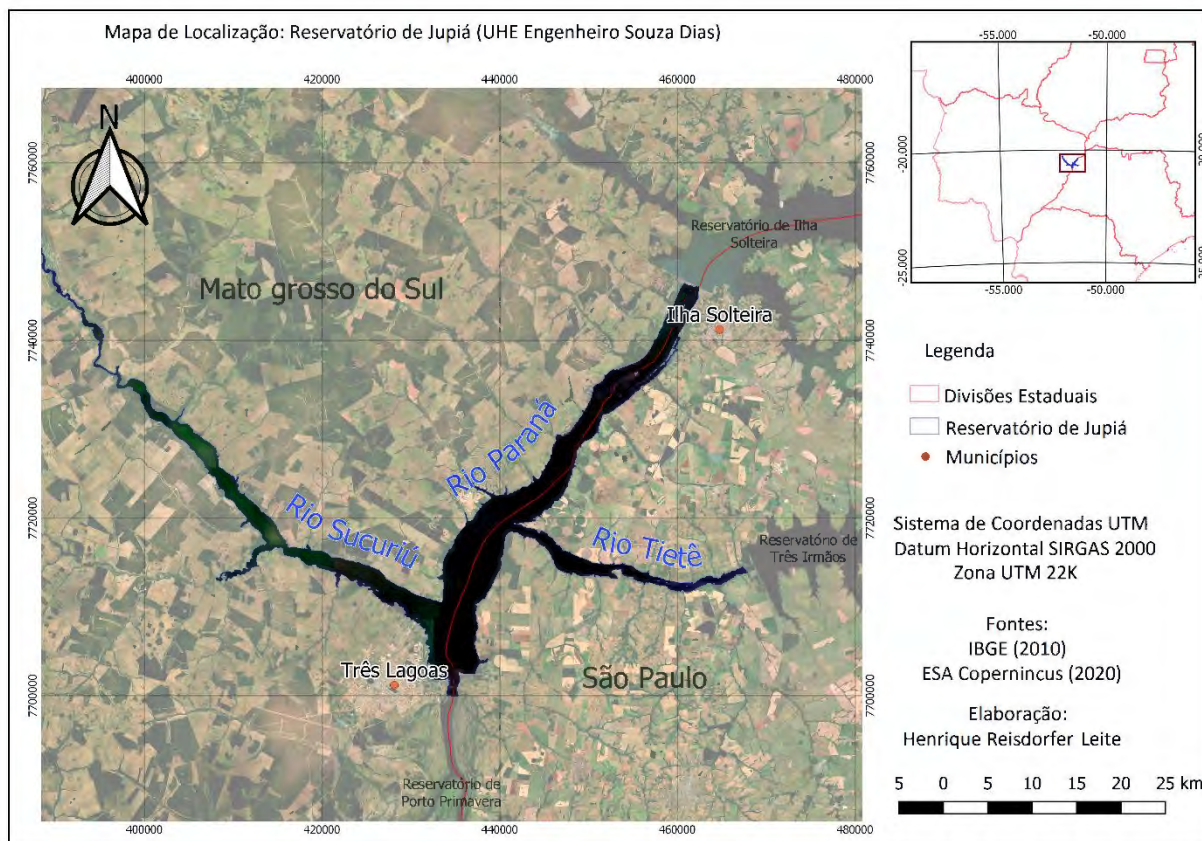
Esta dissertação foi realizada em conjunto com o projeto de pesquisa e desenvolvimento "Monitoramento do desenvolvimento e deslocamento de bancos de macrófitas aquáticas em reservatórios empregando geotecnologias e técnicas de sensoriamento remoto", referente a chamada "PD-10381-0317/2017" da Agência Nacional de Energia Elétrica, realizado pelo Lactec (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) e a China Three Gorges Brasil.

### 1.1 Área de estudo

O reservatório da UHE (Usina Hidrelétrica) Souza Dias (Jupiá) se localiza no rio Paraná, na divisa do estado de Mato Grosso do Sul e São Paulo, entre os municípios de: Castilho, Itapura, Ilha Solteira e Andradina em SP; Selviria e Três Lagoas em MS (FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO). Formado em 1968, compreende uma área de aproximadamente 330 km<sup>2</sup>, tem como principais tributários os rios Sucuriú (margem direita) e Tietê (margem esquerda). As águas do rio Paraná e do rio Tietê são represadas a montante pelas usinas de Ilha Solteira e de Três Irmãos, respectivamente. Apenas o reservatório de Jupiá será analisado. A usina é operada com um volume de geração constante, com o reservatório em fluxo de fio d'água. O reservatório tem tempo de residência médio anual de 6,39 dias (CESP, 2009). Esse tempo de residência baixo se deve ao fato de o reservatório ser de fio d'água, não tendo uma função reguladora do volume (CESP, 2009).

O clima da região onde está situado o reservatório insere-se no Tropical Brasil Central, classificado como quente e úmido, com temperatura média anual acima de 18 °C e compreendendo um a dois meses secos por ano (IBGE, 2002).

FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

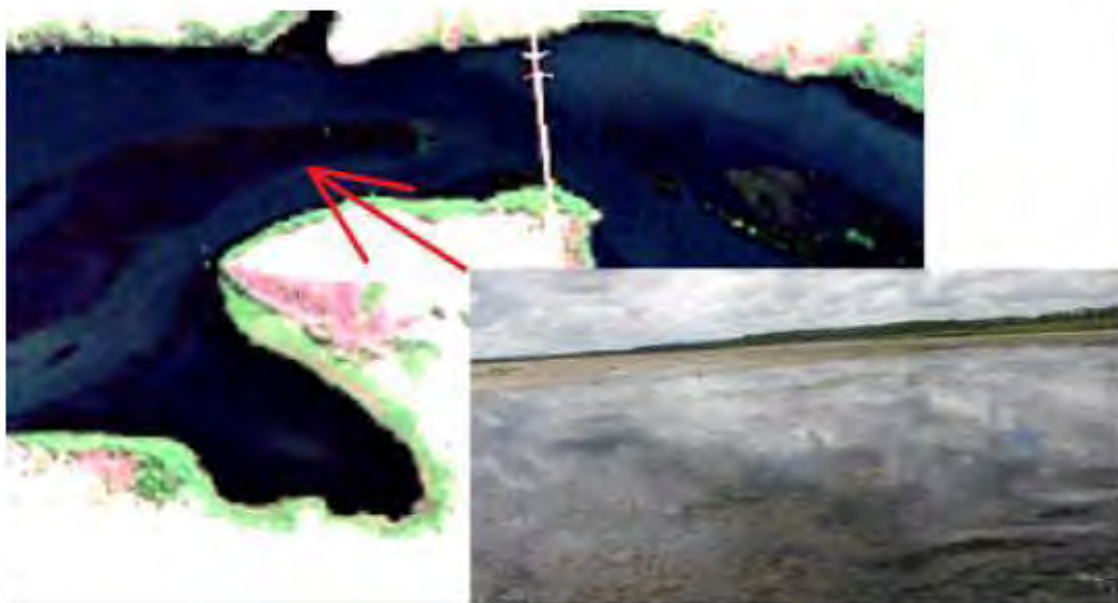


FONTE: O autor (2020).

Segundo Velini et al. (2005), o reservatório apresenta um problema de infestação de plantas aquáticas submersas, flutuantes e emergentes, o que pode afetar a biota local além de prejudicar a operação da usina.

Em trechos do reservatório pode-se observar macrófitas submersas com florações que chegam ao nível da água (de forma geral as espécies *Ceratophyllum demersum* e *Egeria densa*), como mostra a FIGURA 2 – a seguir:

FIGURA 2 – PRESENÇA DE MACRÓFITAS SUBMERSAS COM FLORAÇÕES NO NÍVEL DA ÁGUA



FONTE: O autor (2020).

No reservatório foram identificadas 17 espécies de plantas, das quais apenas três são submersas, porém são as que representam maior biomassa. Medições realizadas no projeto mencionado na introdução (biomassa em campo com métodos tradicionais e com ecobatímetro) identificaram que quase 30% da área do braço do rio Tietê é coberta por plantas submersas, com biomassa seca variando entre 40 a 100 kg/m<sup>2</sup> (LACTEC, 2019). Ainda há a presença dessas plantas no rio Paraná e no braço do rio Sucuriú, porém em menor quantidade. Essa grande floração de plantas pode ser explicada pelas favoráveis condições de crescimento: Alta quantidade de radiação que penetra na lâmina da água e altas temperaturas, além da grande quantidade de nutrientes dissolvidos provindos do braço do rio Tietê (LACTEC, 2019).

Sob o ponto de vista do sensoriamento remoto de corpos d'água, é um caso com certas peculiaridades. O tempo de revisita dos satélites Sentinel-2A e 2B é menor do que o normal por causa de uma particularidade: normalmente, esse tempo seria de 5 dias, mas em grande parte reservatório de Jupia é de 2 a 3 dias, pois o corpo principal e o tributário do Tietê ficam dentro da área de sobreposição de dois *tiles* de cenas diferentes.

O reservatório apresenta características óticas distintas em seus diferentes segmentos, conforme a FIGURA 3 – a seguir:



FIGURA 3 – DIFERENÇAS ÓTICAS ENTRE OS COMPONENTES DO RESERVATÓRIO



FONTE: O autor (2020).

Conforme a FIGURA 3 do reservatório, com contraste exagerado, pode-se ver as diferenças da coloração das águas entre os tributários. O rio Sucuriú (tributário oeste) apresenta águas mais turvas (turbidez entre 10 a 15 NTU), o que com a vazão, já inibe o crescimento das plantas aquáticas. O rio Paraná (corpo principal) apresenta águas mais claras e maiores profundidades, chegando a 50m em alguns trechos (LACTEC, 2019) – nas áreas mais rasas a presença das plantas é significativa. Em contrapartida, o braço do rio Tietê (tributário leste) apresenta turbidez mínima (<2 NTU) e alta absorção da radiação solar, o que pode ser observado na FIGURA 3 como sendo o tributário mais escuro. A alta absorção da luz e penetração dela na lâmina da água é o que permite a taxa de crescimento elevada das plantas submersas. (LACTEC, 2019)

Quanto à questão climática, os meses mais secos e com menos nuvens começam em meados de março e se estendem até outubro, meses que apresentam o maior número de imagens sem ou com poucas nuvens. É comum que no período chuvoso tenham menos que três imagens livres de nuvens por mês. Uma análise mais aprofundada nessa questão foi feita na seção 4.1.1.

Além disso, é notória a presença do fenômeno do brilho do Sol entre os meses de setembro a fevereiro, ocasionado pelo ângulo do Sol em relação a água. O fenômeno pode também ocorrer em dias que a vazão no reservatório é mais elevada pela presença de ondas. Mais detalhes sobre esse fenômeno na seção 2.1.3.

## 1.2 Justificativa

A existência de algoritmos de correção atmosférica específica para aplicações referentes aos corpos d'água é ainda pequena e o conhecimento é esparso na literatura. Alguns desses métodos são integrados em técnicas de mensuração da presença de parâmetros bio-óticos, os quais podem ser usados como parâmetros indicadores de qualidade da água. (Brockmann et al., 2016; Vanhellemont & Ruddick, 2018; Salama & Verhoef, 2015)

Existem vários fenômenos que podem alterar a irradiação captada pelo sensor orbital e comprometer os dados (Leite et al., 2019). Foi levantado durante a pesquisa que é comum os métodos geradores de *máscaras* que retiram das análises os píxeis “comprometidos” não obtenham sucesso (ver seção 4.2).

É proposto nesse trabalho um método baseado em imagens com a criação de uma *base de dados espectral* para cada efeito detectado, além das interações entre eles. Isso é feito devido às particularidades de cada corpo d'água e da atmosfera acima que não podem ser todos levados em consideração nos algoritmos. No caso, os algoritmos são majoritariamente semi-analíticos (Lee, Carder, & Arnone, 2002) ou completamente analíticos – que por si só em vezes são baseados em bibliotecas espectrais geradas a partir de modelagem ou dados *in situ* (mais detalhes na seção 2.2). O procedimento mais utilizado para a validação é a criação do algoritmo e a validação em campo com espectrorradiômetro, não necessariamente nessa ordem.

A hipótese levantada é que os métodos de correção atmosférica, seja de métodos generalizados ou de métodos específicos para corpos d'água, podem levar a erros na identificação de efeitos inerentes a atmosfera e aos corpos d'água.

Em suma, a criação de uma base de dados espectral de forma empírica, baseada nas imagens orbitais, visa comparar os resultados de detecção e classificação dos fenômenos naturais com os métodos analíticos e verificar possíveis

inconsistências/diferenças nos métodos de identificação dos fenômenos e a subsequente criação de máscaras para a retirada de pixels comprometidos.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo geral

Analisar os fenômenos que podem comprometer as informações orbitais obtidas pelo sensor orbital passivo Sentinel-2 sobre um corpo d'água.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Obter série histórica de imagens Sentinel-2, criar e validar uma base de dados espectral dos fenômenos inerentes a atmosfera e a1os corpos d'água detectados;
2. Identificar, em exemplos práticos, o quanto/como os fenômenos afetam os resultados de algoritmos que trabalham com as imagens;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Antes mesmo da utilização de imagens orbitais para medições em corpos d'água, os fenômenos naturais já haviam sido notados pelos cientistas na década de 10 (como por exemplo o estudo de Schmidt, 1915), porém na década de 40 e de 50 que os estudos voltados as propriedades óticas da água se ampliaram com a utilização de fotografias aéreas (ex: Burt, 1953; Duntley, 1950) e alguns dos desafios já apresentados por Cox & Munk (1955).

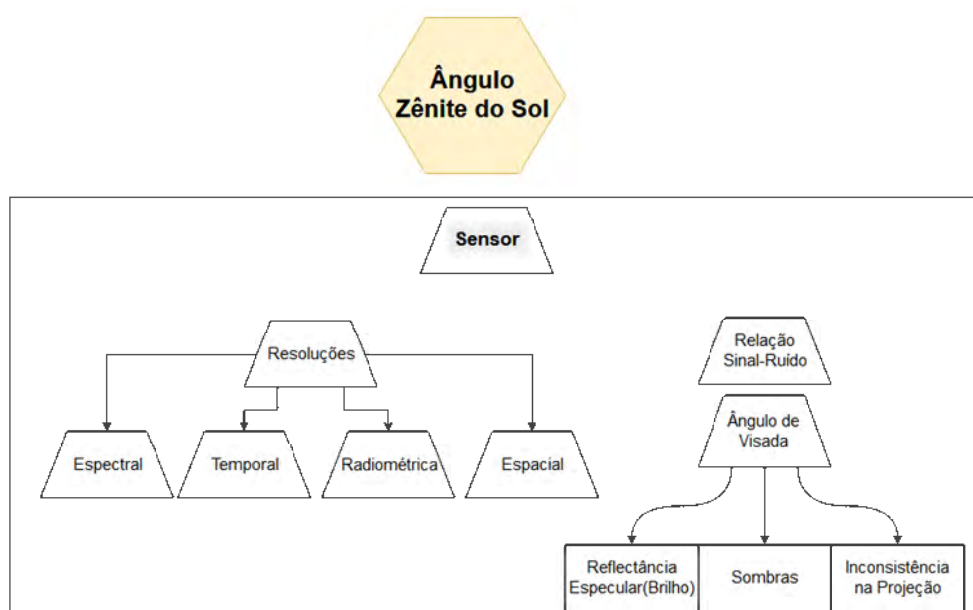
### 2.1 Interação entre a energia solar, o sensor, a atmosfera e a água

A seguir são explicadas para os diferentes meios as formas dessa interação. A forma em que a radiação solar interage com o meio é o que define as respostas espectrais de cada objeto e como elas são captadas pelo sensor.

### 2.1.1 Sensor

Todas as propriedades medidas pelo sensor orbital passivo dependem, primeiramente, da geometria da radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Os sensores medem a radiância ascendente depois que a radiação é refletida pela superfície (Mobley, 1994). De forma geral, os sensores multiespectrais têm suas órbitas sincronizadas com o Sol. (ITC, 2017). Além disso, cada propriedade imageada depende também das características do sensor, conforme a FIGURA 4 – ESPECIFICIDADES DOS SENSORES:

FIGURA 4 – ESPECIFICIDADES DOS SENSORES



FONTE: Leite et al., 2019.

As resoluções do sensor são o segundo ponto mais importante, pois elas que definem a qualidade inicial dos dados obtidos: Espectral (recobrimento no espectro eletromagnético e a quantidade de bandas); Temporal (tempo de revisita); Radiométrica (sensibilidade do sensor na quantificação dos dados); e Espacial (recobrimento em área de cada pixel) (Schowengerdt, 2012).

A relação Sinal-Ruído (SNR) é relacionada ao número de fótons (*quanta* da radiação eletromagnética) captados pelos sensores, tendo mais ruído quando

menos fótons são captados. É menos significativo em sensores multiespectrais devido à resolução espectral menor e à maior largura das bandas se comparado aos hiperespectrais (Moses, Bowles, Lucke, & Corson, 2012).

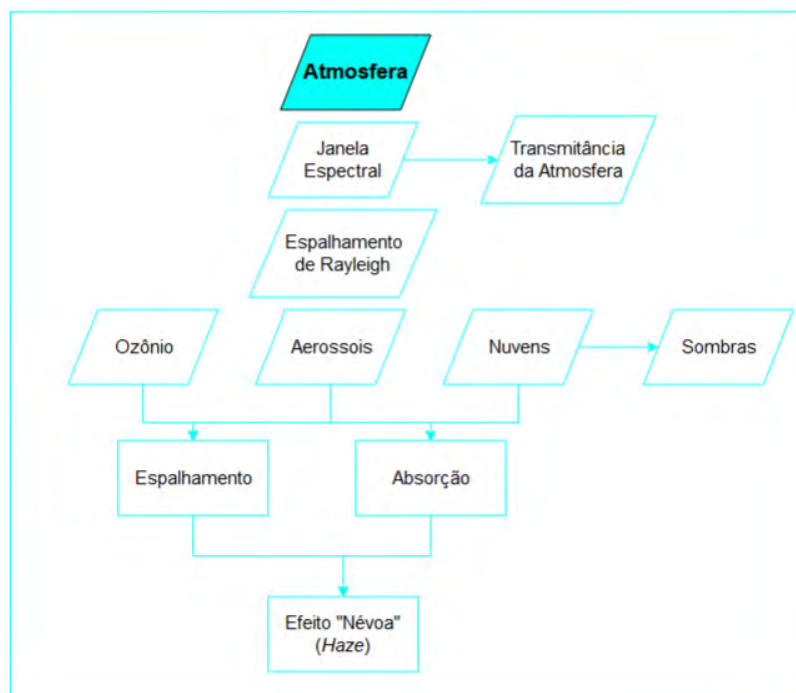
O ângulo de visada pode causar inconsistência na projeção se ele não for diretamente em Nadir ( $90^\circ$ ) em relação à superfície. As sombras de objetos mais altos podem comprometer a resposta espectral de objetos adjacentes (Chen, Li, Huang, & Niu, 2016). Dependendo do ângulo, particularmente em corpos da água com ondas, o sensor pode captar a reflectância especular da superfície (“brilho do Sol”), o que implica que a radiação solar está sendo refletida diretamente ao sensor. Isso resulta numa resposta de reflectância fora do comum para a água (Mobley, Werdell, Franz, Ahmad, & Bailey, 2016).

### 2.1.2 Atmosfera

Antes que qualquer análise possa ser feita sobre o corpo da água, se faz necessária a correção da dispersão da radiação eletromagnética pela atmosfera. Os algoritmos, denominados de correção atmosférica, são diversos, porém a maior parte segue a mesma lógica de balanço de energia pela Equação de Transferência de Radiação (RTE), conforme formulado por Duntley (1942).

Segundo Mobley et al. (2016), a função da correção atmosférica é transformar a reflectância do Topo da Atmosfera (TOA) para reflectância do Fundo da Atmosfera (BOA), ou reflectância da superfície da terra. Essencialmente, o que isso faz é retirar os valores parciais relacionados aos efeitos atmosféricos da radiação total que está adentrando a atmosfera. A FIGURA 5 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA RADIAÇÃO SOLAR ilustra esses efeitos:

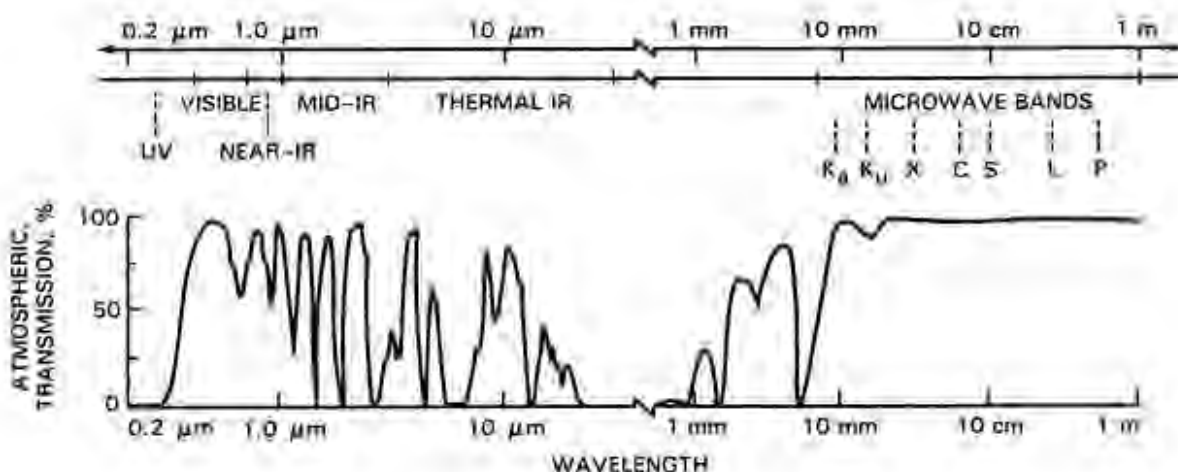
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA RADIAÇÃO SOLAR



FONTE: Leite et al. (2019).

Primeiramente, a janela atmosférica é o que define se a radiação eletromagnética vai ser totalmente refletida nas camadas mais superiores da atmosfera, ou se será transmitida diretamente dentro da atmosfera e chegará em superfície. A transmitância (capacidade de transmitir a radiação) da atmosfera define o que pode ser medido da superfície, pois ela limita os comprimentos de onda da radiação solar. O GRÁFICO 1 abaixo mostra os comprimentos de onda em relação à porcentagem de transmissão da atmosfera - os comprimentos de onda captados pelos satélites estão em regiões em que a transmitância é próxima à 100%:

GRÁFICO 1 – TRANSMITÂNCIA DA ATMOSFERA

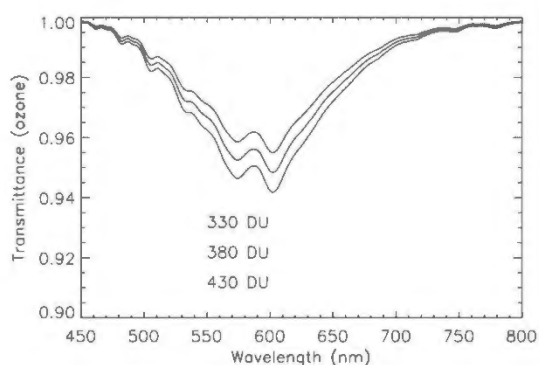


FONTE: Henderson & Lewis (1998)

Dentro da atmosfera, em suma, a radiação solar pode sofrer dois efeitos: Absorção ou Difusão, normalmente o Difusão de Rayleigh, que ocorre quando as partículas dos gases são menores que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação eletromagnética.

A camada de Ozônio tem influência entre as regiões do Verde e *red-edge* do espectro eletromagnético, dependendo da grossura, pode influenciar em até 10% da reflectância (Richter, Heege, Kiselev, & Schlöpfer, 2014). Segundo o repositório *Global Ozone Maps* ([https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/Curr\\_allmap\\_g.htm](https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/Curr_allmap_g.htm)) para a área de estudo estima-se que a camada de ozônio tem em torno de 280 DU (*Dobson Units*), o que pode diminuir em ~2 a 3% os valores de reflectância, conforme mostra o GRÁFICO 2:

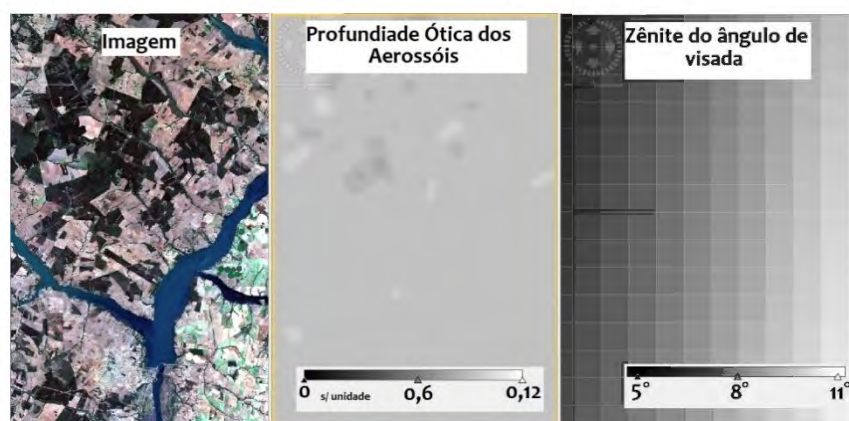
GRÁFICO 2 – CURVAS DE TRANSMITÂNCIA DA CAMADA DE OZÔNIO PARA VISADA EM NADIR



FONTE: Richter et al. (2014).

A presença de Aerossóis (AOT) – gases e sólidos em suspensão ‘estranhos’ à atmosfera (poluição, nuvens e vapor de água/umidade) – pode comprometer os dados pela absorção e a difusão da radiação. Grande parte dos algoritmos de correção atmosfera contam com a detecção da profundidade ótica dos Aerossóis, portanto sendo possível a correção deles, salvo casos extremos. A FIGURA 6 ilustra a distribuição da AOT e dos ângulos de visada na cena.

FIGURA 6 – MAPA DE PROF. ÓTICA DOS AEROSSÓIS SOBRE O RESERVATÓRIO E DOS ÂNGULOS DE VISADA



FONTE: O autor (2020).

As nuvens apresentam alto retrodifusão da radiação solar e pouca transmitância – o que explica sua cor esbranquiçada – dependendo de suas

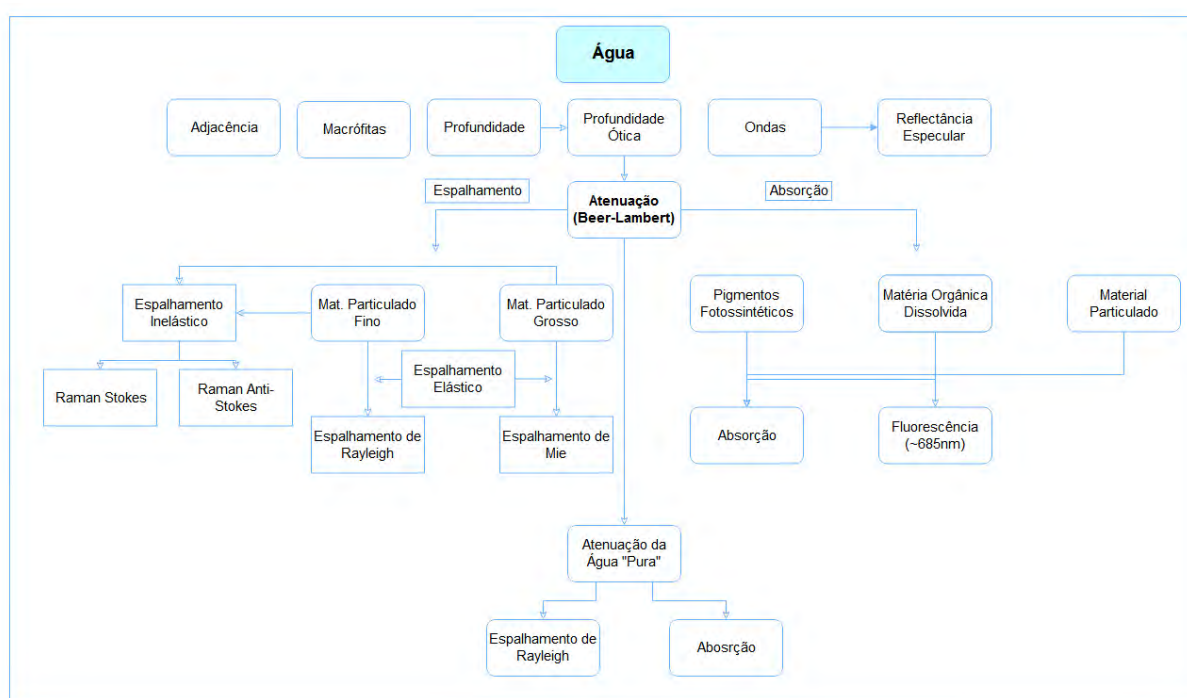


densidades, podem comprometer totalmente a reflectância da superfície. As sombras das nuvens deixam a reflectância menor do que ela deveria ser.

### 2.1.3 Água

O comportamento da radiação, quando incidente sobre a água, foi esquematizado e ilustrado na FIGURA 7:

FIGURA 7 – COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR QUANDO INCIDENTE SOBRE A ÁGUA.



FONTE: Leite et al. (2019).

No caso específico desse estudo, os efeitos da radiação na água foram elencados:

Efeito de Adjacência: Ocorre quando o “brilho” dos pixels em terra, adjacentes aos de água, reduzem o contraste dos pixels sobre a água. É um dos efeitos mais significativos e sua correção é complexa (Kiselev, Bulgarelli, & Heege, 2015). A FIGURA 8 ilustra esse efeito. Para a figura, foi usado o mesmo intervalo de visualização no histograma, é possível ver uma grande diferença em contraste.

FIGURA 8 – DIFERENÇA DA MESMA IMAGEM COM E SEM A CORREÇÃO DE ADJACÊNCIA, USANDO O MESMO INTERVALO NO HISTOGRAMA



LEGENDA: Usando o mesmo intervalo no histograma. Notar a diferença de contraste.

FONTE: O autor (2020).

Presença de plantas aquáticas (Macrófitas) – A alta quantidade de pigmentos fotossintéticos das plantas aquáticas dentro do corpo da água pode interferir na radiância ascendente, principalmente nas regiões do infravermelho, como será demonstrado nas próximas seções.

Profundidade Ótica – É definida pela profundidade que a radiação consegue penetrar na lâmina da água, impactada pelo coeficiente de atenuação, conforme a Lei de Beer-Lambert. Quando a profundidade ótica é igual a profundidade da água, o fundo interfere na radiância ascendente, aumentando a reflectância. (Mckinna & Wedell, 2018).

Dentro da água, os constituintes oticamente ativos são o que definem o comportamento da radiação solar, além das próprias partículas de água. A atenuação é dada pela soma da absorção e espalhamento. Se medidos, essas duas propriedades podem ser usadas para estimar parâmetros de qualidade da água. (IOCCG, 2020)

Os métodos de obtenção dos dados de qualidade da água (denominados algoritmos bio-óticos), similarmente a correção atmosférica, utilizam-se da Equação de Transferência de Radiação (RTE) para obter os dados, a diferença sendo o meio em que a luz do sol atravessa é a água ao invés da atmosfera. Como a atmosfera foi “retirada” através da correção atmosférica, o foco aqui é a reflectância na água do reservatório. Segundo a literatura, essa abordagem é viável, contanto que se disponha de dados das *propriedades óticas da água*.

Existem dois tipos de propriedades óticas da água:

- Propriedades Óticas Inerentes (IOP na sigla em inglês): “São as propriedades que dependem apenas das características do meio (nesse caso, a água). As duas propriedades fundamentais são o coeficiente de absorção (a) e o coeficiente de difusão (b).” (Mobley, 1994, p.60) As demais propriedades podem ser derivadas deles.

- Propriedades Óticas Aparentes (AOP na sigla em inglês): “São as propriedades que dependem das características do meio (ou seja, as IOP) e também na estrutura geométrica do campo de luz ambiente, a qual demonstra feições regulares e estáveis o suficiente para serem descritores úteis do corpo d’água” (Mobley, 1994, p.61). Segundo este e demais autores, os dados de reflectância, as propriedades geométricas direcionais da luz do sol e os coeficientes de atenuação são as AOP mais comuns.

Essencialmente, a luz solar quando incide sobre a água é absorvida ou refletida pelas moléculas. O sensor orbital consegue captar o quanto de radiância é refletida pela superfície da água e converter essa radiância em dados de reflectância, que é a relação entre a radiância incidente sobre a superfície e o quanto dessa radiância foi devolvida para a atmosfera. Sabendo disso, é possível calcular o quanto de energia solar foi absorvida ou espalhada pela superfície da água. Esse cálculo se chama Coeficiente de Atenuação Espectral do Feixe (c), e é igual à soma do Coeficiente de Absorção (a) e o Coeficiente de Difusão (b) (Mobley, 1994; Zhang, 2018; IOCCG, 2020).

A difusão ocorre quando a radiação solar é desviada. Ela pode ser elástica (quando o  $\lambda$  não muda depois da reflexão) ou inelástica/Raman (quando o  $\lambda$  muda depois da reflexão, para mais ou menos). A difusão elástica pode ser de Rayleigh (tamanho das partículas  $< \lambda$  da radiação) ou de Mie (tamanho das partículas  $> \lambda$  da radiação) (Mobley, 1994). Há controvérsias se a difusão de Raman pode ser detectada por sensores multiespectrais. Na literatura, estima-se que ele pode interferir em até aprox. 15% da reflectância de águas pouco turvas, gerando ruído (Westberry, Boss, & Lee et al., 2013; Vountas, Richter, Wittrock, & Burrows, 2003; Vigneshwaran, Shanmugam, Gokul, 2015).

A absorção é dada, principalmente, por pigmentos fotossintéticos (ex: clorofila) e matéria orgânica dissolvida ou em suspensão (Zhang, 2018; IOCCG, 2020). A absorção pode se transformar em fluorescência, de forma similar à difusão de Raman anti-stokes, emitir ondas de comprimento de onda maiores que a

radiação absorvida (Mobley, 1994; IOCCG, 2020). Entretanto, são fenômenos de ordem física diferente, visto que um é apenas espalhamento (reflexão) e o outro é emissão gerada por absorção.

A partir das IOP, é possível se obter as AOP da água. Os coeficientes de atenuação são uma dessas propriedades aparentes. Um exemplo de AOP é o Coeficiente de Atenuação Difusa para Irradiância Descendente ( $K_d$ ). Esse coeficiente traz consigo informações quantitativas dos valores de atenuação (extinção) da luz solar dentro da água, permitindo uma análise detalhada da presença de materiais presentes no corpo da água, sejam eles em suspensão ou dissolvidos (Zhang, 2018; IOCCG, 2020).

Os parâmetros de qualidade da água têm um fator de correlação com essas propriedades da água, conforme bem demonstrado na literatura (Salama & Verhoef, 2015; Lee et al., 2002; Heege, Kiselev, Wettle, Hung, 2014).

Para a aplicação específica em sensoriamento remoto aquático, os relatórios IOCCG apresentam, possivelmente, a maior biblioteca de referência em espectros de diversos IOP e AOP, com dados simulados e dados in-situ. O Relatório 5 (IOCCG, 2006) contém valores de referência para  $a_{pig}$ ,  $a_{det}$ ,  $a_g$ ,  $b_b$ ,  $b_{bpig}$ ,  $b_{bp}$ ,  $R_{rs}$ ,  $R$ , e  $K_d$  (para profundidades entre 0 e 40m), todos eles para ângulos de zênite do Sol de 30° e 60° em intervalos de  $\lambda=10nm$ . O Relatório 10 (IOCCG, 2010) contém valores de referência específicos para sensoriamento remoto orbital, apresentando valores de radiância TOA para diversas condições de qualidade da água e AOT.

Além disso, existem vários outros estudos com valores de referência para determinadas aplicações, sendo a utilização da poderosa ferramenta de modelagem baseada em métodos numéricos Hydrolight para água. (Fearn, Dekker, & Lynch, 2001; von Bismarck, Doerffer & Fischer, 2011; Sundarabalan, Pshanmugam & Ahn, 2016; Pereira-Sandoval et al., 2018; Palmer et al., 2015)

Alguns dos métodos proeminentes de geração de valores de referência para transferência de radiação na água e na atmosfera, por exemplo, é a utilização de modelagem monte-carlo (Mobley et al., 2016) e a geração de modelos baseados em redes neurais (Doerffer & Schiller, 2008; Richter et al., 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos e as ferramentas utilizadas para a realização dos objetivos desta dissertação são apresentados nessa seção.

### 3.1 Primeiro objetivo

O estudo é centrado ao redor do primeiro objetivo “Obter série histórica de imagens Sentinel-2 e criar uma base de dados dos fenômenos inerentes a atmosfera e aos corpos d’água detectados;”, sendo os outros dois objetivos reservados para comparação. Os métodos de efetivação desse objetivo serão descritos nas próximas seções. Os passos a seguir foram realizados no intuito de extração dos valores de reflectâncias e suas variações para cada banda, para cada fenômeno identificado.

A FIGURA 9 ilustra o fluxograma de trabalho para o primeiro objetivo.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO – PRIMEIRO OBJETIVO



FONTE: O autor (2020).

#### 3.1.1 Download de série histórica

A criação da base de dados necessita primeiramente dos dados distribuídos entre diversas condições presentes nas imagens para poder englobar o máximo de possibilidades. Com isso, a série histórica selecionada para as imagens foi de um ano, entre maio de 2018 e junho de 2019. Todas as imagens da missão Sentinel-2

(S2A e S2B) foram baixadas nesse intervalo, utilizando o TILE\_ID = T22KDC, que é a designação da ESA de identificação de cada cena, nesse caso a cena que engloba maior parte reservatório de Jupia (FIGURA 10).

FIGURA 10 – CENAS DO SENTINEL-2 SOBRE A ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2020).

As imagens foram baixadas de forma gratuita utilizando a API para *python* disponibilizado pelo *Copernicus Open Access Hub* da ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>). As imagens podem ser baixadas utilizando o portal web com interface gráfica, porém a API foi escolhida pois é mais estável e facilita o download de séries históricas. No total, 175 imagens foram baixadas.

### 3.1.2 Critério de seleção, classificação e separação das imagens

As imagens baixadas foram separadas visualmente em três categorias:

Categoria 1: Cobertas de nuvens – Em suma, as imagens onde não é possível enxergar a maior parte do reservatório devido à presença das nuvens. O total de imagens nessa categoria foi de 50 imagens. Essas imagens foram descartadas, a



detecção das nuvens por parte de algoritmos de correção atmosférica já está bem fundamentada na literatura.

Categoria 2: Com fenômenos – As imagens foram todas visualizadas procurando fenômenos naturais que possam afetar a reflectância pura do corpo d'água. Esses fenômenos serão descritos na próxima seção de forma mais aprofundada. Em suma, os fenômenos de brilho do sol e vapor na atmosfera – os mais visíveis – e as suas diversas combinações com outros efeitos. A quantidade de imagens nessa categoria é de 93.

Categoria 3: Limpas – As imagens que não tinham nenhum efeito visível sobre o corpo d'água. O total nessa categoria é de 32 imagens.

### 3.1.3 Criação dos pontos de amostragem e extração de valores

Tendo as imagens categorizadas, os pontos de amostragem para a criação da base de dados foram gerados. As amostras foram coletadas utilizando o software QGIS versão 3.14 e salvas em *shapefiles*. As amostras foram coletadas, primeiramente, para as **imagens TOA apenas**, sendo que as imagens com correções atmosféricas (BOA) variam de acordo com o algoritmo utilizado, os quais serão exploradas nas próximas seções. Para tal, três procedimentos diferentes foram realizados, como descrito nas próximas seções.

#### 3.1.3.1 Águas claras

Como as imagens categorizadas como “limpas” não têm nenhum efeito visível, os pontos de amostragem foram coletados de forma aleatória. Esse processo foi automatizado utilizando um código em *python* compilado pelo autor, utilizando ferramentas das bibliotecas *fnmatch*, *pathlib*, *gdal*, *geojson*, *shapely* e *pandas*.

No código, os pontos com coordenadas aleatórias são criados obedecendo a condição de que eles só podem ser gerados dentro da área de um shapefile especificado, nesse caso a área do reservatório.

Conforme descrito na introdução, existe uma diferença ótica das três áreas principais que formam o reservatório (braço do rio Sucuriú, braço do rio Tietê e o corpo principal no rio Paraná). Com isso, foi testado se essa diferença ótica é suficiente para alterar os valores de reflectância de forma significativa. Um total de 10 amostras para cada área foram geradas, por imagem. Além disso, áreas do reservatório conhecidas que apresentam águas óticamente rasas e presença de plantas aquáticas foram retiradas dos *shapefiles* que limitam a área de ação do código gerador de pontos aleatórios.

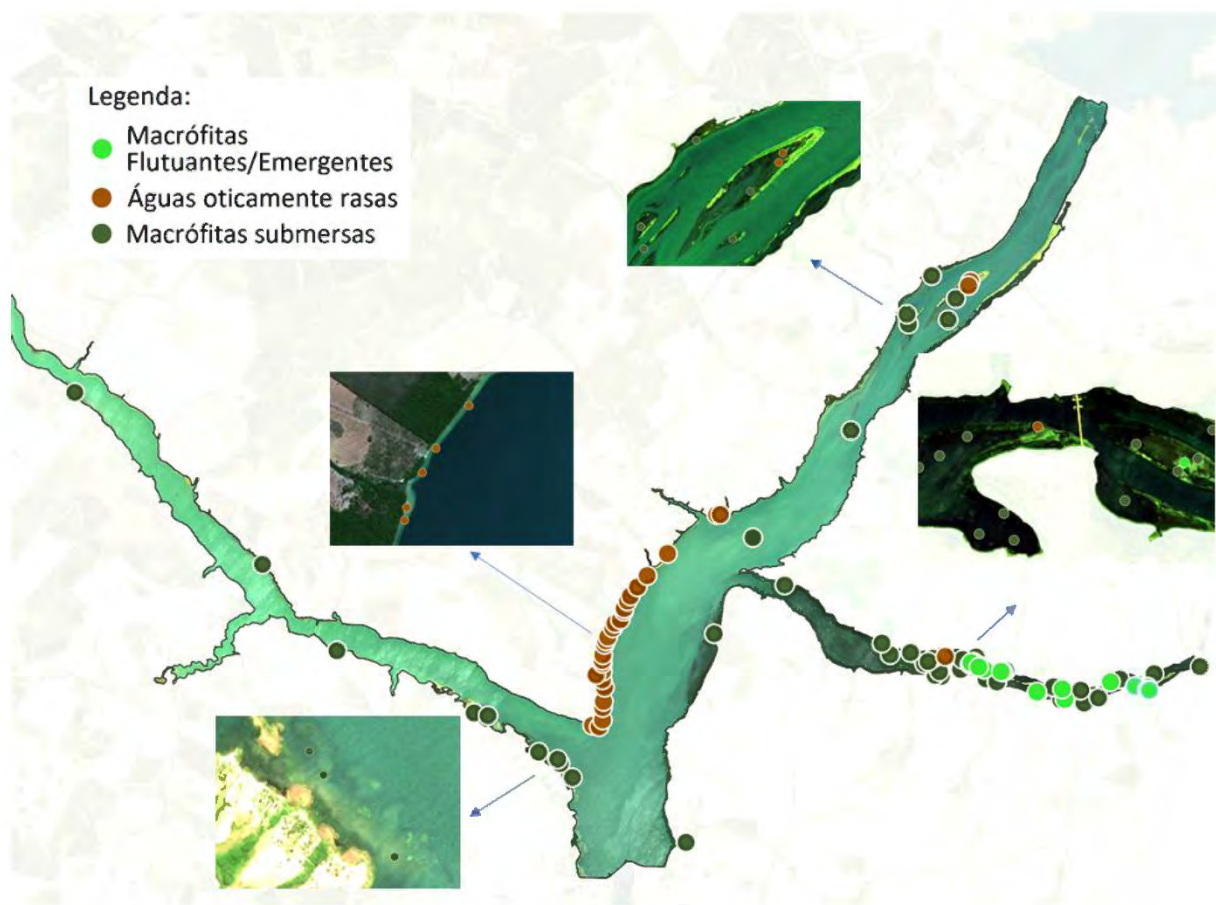
Com os pontos criados, os valores de reflectância para cada banda das imagens foram extraídos para cada imagem e seu *shapefile* de pontos aleatórios atribuído a ela utilizando o *plugin Point Sampling Tool* disponível no *software* QGIS, inserindo os valores das reflectâncias nas tabelas de atributos dos *shapefiles* dos pontos de amostragem. Os valores presentes nos arquivos dbf foram concatenados utilizando a biblioteca *geopandas* para *python* e exportados para a uma tabela *excel*.

### 3.1.3.2 Fenômenos de natureza ‘estática’

Alguns dos fenômenos que afetam a reflectância natural do corpo d’água são ‘estáticos’ no reservatório. Como mencionado anteriormente, eles são em suma as águas óticamente rasas – onde a reflectância do leito do reservatório é transmitida totalmente na lâmina da água – e a presença das macrófitas e/ou macroalgas. Esses fenômenos podem ser prejudiciais às medições de parâmetros de qualidade da água por imagens orbitais, por exemplo. Os locais de ocorrência deles foram identificados em visitas em campo, além de imagens de drone, relativos ao projeto mencionado na introdução. A FIGURA 11 abaixo ilustra os pontos de amostragem distribuídos ao longo do reservatório:

FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM PARA OS FENÔMENOS DE NATUREZA ESTÁTICA





FONTE: O autor (2020).

A figura 13 mostra uma condição extrema de crescimento das macrófitas aquáticas, próximo a ponte da rodovia SP-595 sobre o rio Tietê, local notório pela grande presença das plantas, conforme pode ser visto na FIGURA 12.

FIGURA 12 – ALTA PRESENÇA DE MACRÓFITAS NO BRAÇO DO RIO TIETÊ



FONTE: O autor (2020).

Os pontos foram inseridos em locais com diversas particularidades, conforme mostra a figura acima. A extração dos valores de reflectância foi realizada sobre as **imagens classificadas como “limpas”**, através de código em linguagem *python* compilado pelo autor, usando as bibliotecas *rasterio*, *geojson*, *shapely*, *geopandas* e *pandas*.

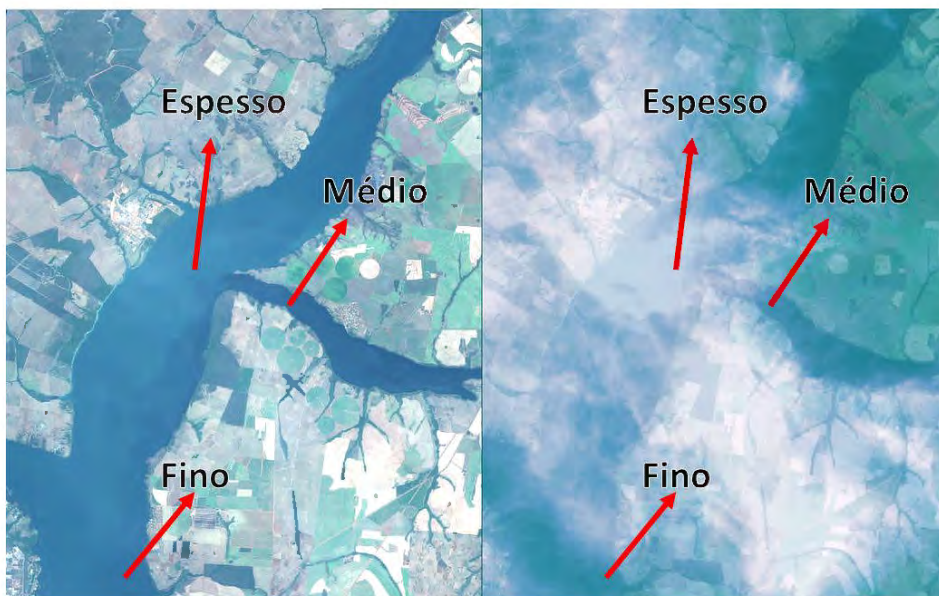
### 3.1.3.3 Outros fenômenos

Os outros fenômenos que não têm natureza estática foram sendo identificados ao longo da análise visual das imagens da série histórica e durante a criação dos pontos de amostragem. A cada efeito foi atribuído um número de identificação próprio.

Assim como para categoria 3, os pontos foram classificados também de acordo com sua área da ocorrência do fenômeno correspondente. A seguir, a explicação dos números de identificação, com imagens de exemplo para cada:

Vapor – O vapor na atmosfera foi classificado seguindo os valores de reflectância da irradiância ( $R$ ) da banda 10 (1373nm): para  $0.0015 \leq R_{(1373)} < 0.0035$  = fino; para  $0.0035 \leq R_{(1373)} < 0.007$  = médio; e para  $R_{(1373)} \geq 0.007$  = espesso. Esses valores foram definidos analisando os histogramas das imagens. Mais detalhes sobre os motivos de se usar a banda 10 para detecção de vapor podem ser encontrados em Coluzzi, Imbrenda, Lanfredi, & Simoniello (2018). A classificação de espessura do vapor foi mantida para todos os fenômenos combinados com o próprio vapor, pois não foi identificada retrodifusão por parte dos outros fenômenos nos comprimentos de onda abrangidos pela banda 10. A FIGURA 13 ilustra essas diferentes espessuras em uma imagem em ‘cor real’ sobreposta por uma imagem da banda 10.

FIGURA 13 – EXEMPLO DAS DIFERENTES ESPESSURAS DE VAPOR NA ATMOSFERA



FONTE: O autor (2020).

Brilho – A classificação do brilho foi feita de forma visual por seu distinto contraste entre os pixels sem brilho, conforme mostra a FIGURA 14, em uma área com pouco vapor.

FIGURA 14 – BRILHO DO SOL NO RESERVATÓRIO

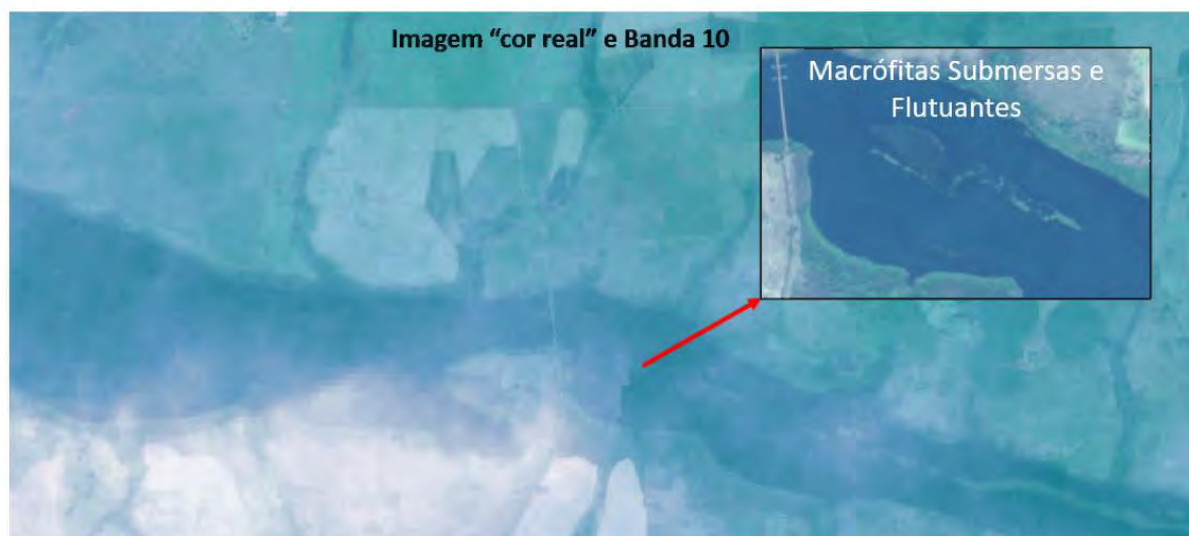


FONTE: O autor (2020).

Vapor sobre macrófitas – Locais onde há a presença de vapor sobre regiões com plantas aquáticas, ilustrada na FIGURA 15.



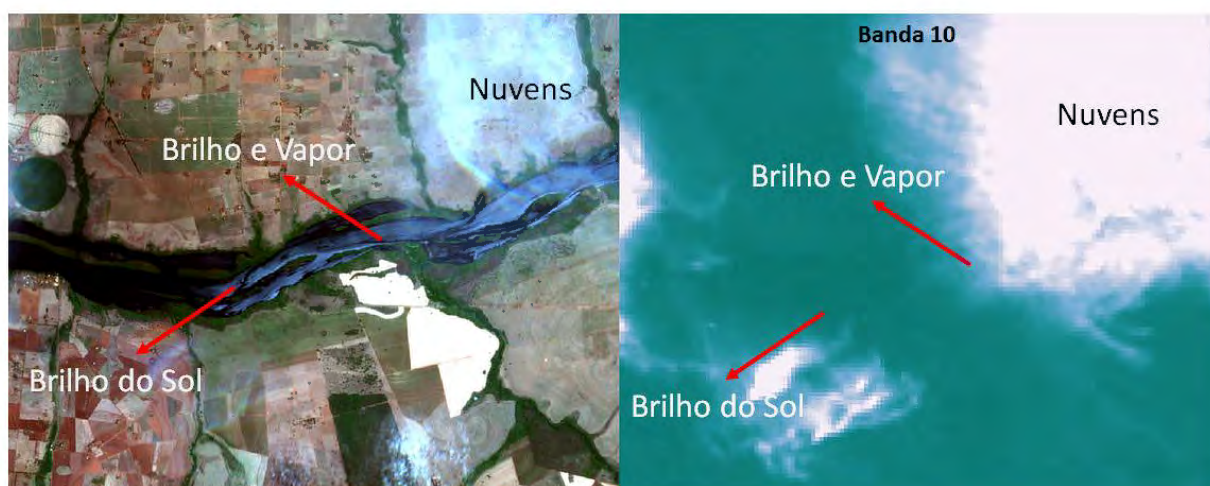
FIGURA 15 – VAPOR SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS



FONTE: O autor (2020).

Brilho e Vapor – Locais onde há a presença de vapor sobre o fenômeno do brilho do sol na superfície da água, ilustrado na FIGURA 16. O motivo do teste com essa combinação foi verificar no objetivo 3 a “eficácia” dos algoritmos de correção atmosférica que contam com correção de brilho.

FIGURA 16 – BRILHO DO SOL E VAPOR SOBRE A ÁGUA

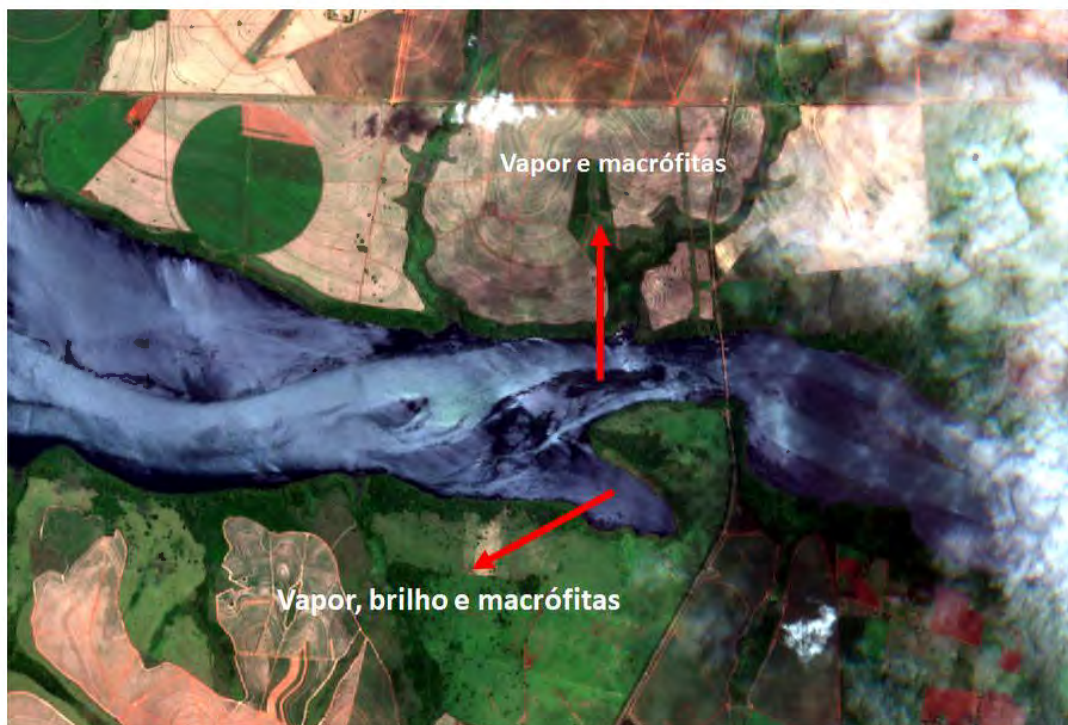


FONTE: O autor (2020).

Brilho e Macrófitas – Ocorrência de brilho do sol na superfície da água sobre áreas com macrófitas submersas, ilustrado na FIGURA 17.

Brilho, Macrófitas e Vapor – Vapor na atmosfera sobre área com brilho do sol na superfície da água com macrófitas submersas, também ilustrado na FIGURA 17.

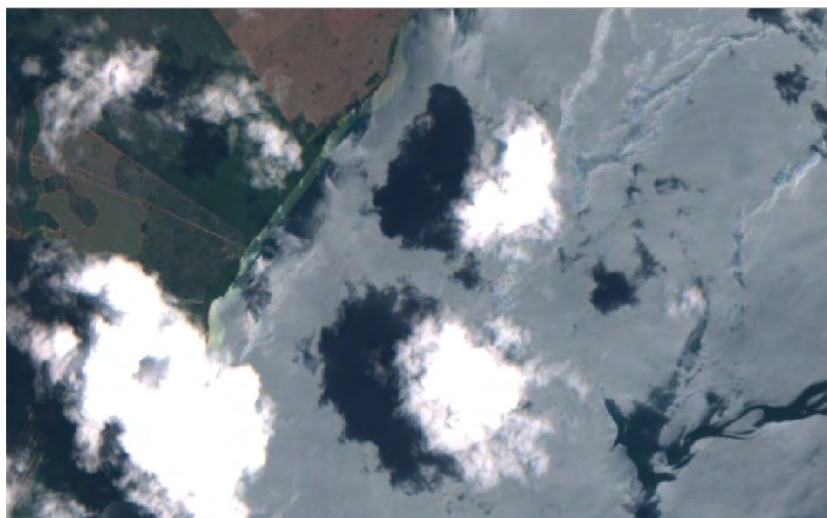
FIGURA 17 – VAPOR, BRILHO DO SOL E MACRÓFITAS AQUÁTICAS



FONTE: O autor (2020).

Sombras de nuvens – A presença das sombras das nuvens e sua combinação com todos os outros fenômenos relacionados ao vapor e a presença de plantas na água, ilustrado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – SOMBRAS DE NUVENS SOBRE O RESERVATÓRIO



FONTE: O autor (2020).

O procedimento de extração dos valores das reflectâncias para cada fenômeno foi o mesmo descrito na **seção 3.1.3.1**.

#### 3.1.4 Organização

Tendo todos os pontos com seus identificadores dos fenômenos correspondentes e os valores de reflectância inseridos, os arquivos foram concatenados utilizando um script em *python* com a biblioteca *pandas*, exportados para planilhas *excel* e retrabalhados para a plotagem dos resultados em gráficos do tipo *boxplot*, utilizando um intervalo de confiança de 95% - gerados usando a biblioteca *seaborn*. Os gráficos criados servem como resumo dos valores da base de dados.

A escolha dos gráficos *boxplot* ao invés do usual gráfico de curvas espectrais foi devido ao fato que a distância entre os comprimentos de onda das bandas do sensor MSI são expressivas, a utilização de um gráfico de linhas estaria inferindo valores que podem não corresponder à realidade. Salvo sensores hiperespectrais, a utilização de gráficos de linha para representação das curvas espectrais pode ocultar informações que não foram medidas pelo sensor.

#### 3.1.5 Comparação

A comparação foi realizada utilizando uma série histórica de imagens diferentes, compreendendo um total de 14 imagens distribuídas entre julho de 2019 e janeiro de 2020. Os fenômenos comparados foram: Águas claras; vapor; brilho; vapor e brilho; sombra de nuvens – em suas diferentes intensidades. Os fenômenos de natureza estática, além das combinações de brilho e vapor com as plantas aquáticas, não foram utilizados pois essas áreas deveriam ser desconsideradas para qualquer análise de reflectância que não envolvam os estudos delas mesmas.

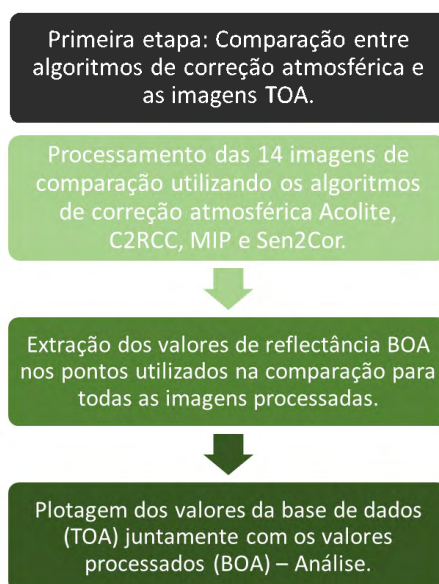
Para a realização da comparação, os valores dos pontos extraídos para cada imagem foram plotados sobre os gráficos *boxplot* da base de dados, gerados anteriormente. Para tal, foi utilizado a função *sns.stripplot* da biblioteca *Seaborn* em linguagem *Python*. A comparação foi feita analisando se a variação dos pontos corresponde a variação observada na base de dados.

### 3.2 Segundo objetivo

Para a realização do segundo objetivo “Identificar, em exemplos práticos, o quanto/como os fenômenos afetam os resultados de algoritmos que trabalham com as imagens” foram escolhidos.

Os fluxogramas de trabalho das duas etapas deste objetivo são apresentados na FIGURA 19 e na FIGURA 20

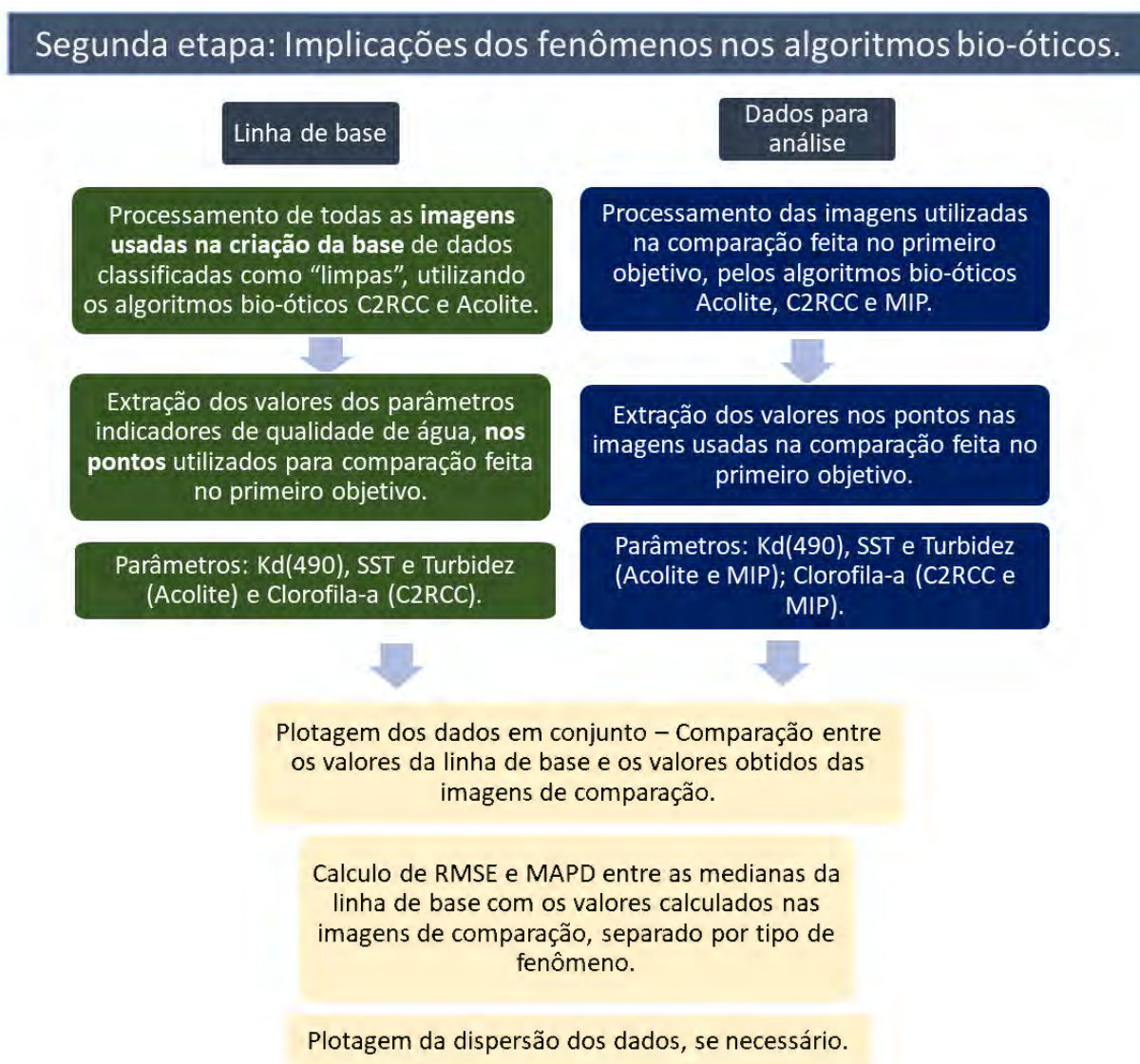
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO – ETAPA 1 DO OBJETIVO 2





FONTE: O autor (2020).

FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO – ETAPA 2 DO OBJETIVO 2



FONTE: O autor (2020).

Em uma primeira análise, foram verificadas as alterações nas variações das curvas espectrais de cada um dos fenômenos para quatro algoritmos de correção atmosférica diferentes:

- Acolite: Desenvolvido por Vanhellemont & Ruddick (2018) em cima do algoritmo de correção atmosférica *Dark Spectrum Fitting*, criado especificamente para ser utilizado sobre corpos d'água, ao contrário da maioria dos métodos de correção atmosférica. Conta com correção do efeito de adjacência e de brilho do



Sol. Algoritmos de extração de AOP e IOP desenvolvidos por outros autores também são inclusos. O método de extração dos valores de  $K_d(490)$  utilizado é o de Lee et al. (2005), o qual determina que os valores de  $K_d$  para determinado comprimento de onda é diretamente proporcional a soma dos valores de retrodifusão e de absorção do material, além de serem determinados pelo ângulo da luz incidente. Para SST, o método de extração utilizado no algoritmo Acolite é o de Nechad et al. (2010), o qual assume que a concentração de SST é diretamente proporcional a intensidade da retrodifusão de material particulado ( $b_{bp}$ ) e, em menor escala, a absorção de material particulado ( $a_{det}$ ) – o mesmo valendo para o método de extração de valor de turbidez de Dogliotti et al. (2015).

- MIP System: Algoritmo utilizado pela empresa alemã EOMAP GmbH, conta com correção atmosférica e de extração de IOPs e AOPs. É considerado um sistema totalmente analítico que depende apenas de simulações da solução do método inverso da RTE (Kisselev, Heege, Miksa & Pinnel, 2005).

- C2RCC: Algoritmo de correção atmosférica e de extração de IOPs e AOPs desenvolvido sobre uma larga biblioteca espectral resultado de simulações de transferência de radiação, em aplicação usando redes neurais (Brockmann et al, 2016; Doerffer & Schiller, 2008)

- Sen2Cor: Algoritmo padrão utilizado pela ESA para as imagens L2A do satélite Sentinel-2, conta com a correção atmosférica, produção de mapas de classificação não supervisionada de cena (ver seção 3.3.2), mapas de AOT e vapor da água na atmosfera (apenas sobre terra). As imagens L2A podem ser baixadas diretamente do portal da ESA ou podem ser criadas pelo usuário usando configurações desejadas no software SNAP (Richter et al., 2012). Por não ser um algoritmo bio-ótico, foi utilizado apenas na análise da primeira etapa.

O objetivo da primeira análise é verificar como as diferentes ferramentas integradas aos algoritmos lida em face aos fenômenos presentes nas imagens.

Feita esta análise, três metodologias diferentes de aplicação do sensoriamento remoto aquático em águas continentais foram testadas: Algoritmos de medição de parâmetros indicadores de qualidade da água óticamente ativos.

Como explicado na seção 2.1 esses algoritmos em suma medem os parâmetros relacionados com a retrodifusão da luz solar (turbidez, sólidos suspensos, profundidade de penetração da luz na água,...) e relacionados com a

absorção (pigmentos fotossintéticos, matéria orgânica amarela '*gelbstoff*', absorvância de matéria orgânica e inorgânica,...) na água.

Nesta etapa foram analisados a intensidade da alteração nos valores dos parâmetros resultantes dos algoritmos, resultante da 'interferência' dos fenômenos naturais estudados. Para isso, foi primeiro feito uma análise de linha de base para identificar valores normais em imagens 'limpas' e depois uma análise com imagens afetadas, utilizando os mesmos pontos criados na etapa de comparação (seção 3.1.5).

Os fenômenos utilizados foram os mesmos da comparação realizada no primeiro objetivo.

### 3.2.1 Primeiro teste – comparação das reflectâncias BOA e TOA

Nesta etapa, utilizando os valores de reflectâncias TOA da base de dados como referência, foram plotados e comparados os valores de reflectâncias BOA para os pontos utilizados nas imagens de comparação, processadas pelos quatro algoritmos citados no item anterior.

Como algumas das bandas do sensor MSI são auxiliares, a reflectância de algumas não é calculada como produto dos algoritmos. Dos quatro algoritmos, apenas o Sen2Cor tem como produto os valores da banda 9. Nenhum deles calcula os valores da banda 10. O C2RCC não tem como produto os valores da banda 8, 9, 10, 11 e 12.

Para evitar com que os comportamentos dos algoritmos não apareçam totalmente, as máscaras dos algoritmos foram desativadas. Por certas complicações, não foi possível desativar totalmente as máscaras do algoritmo MIP, portanto o número de amostras para esse algoritmo é menor na maioria dos casos – os valores utilizados são os dos fenômenos que não foram detectados pela máscara deste algoritmo.

Para visualizar a distribuição das reflectâncias TOA foram utilizados gráficos box plot. Como os dados foram comparados com quatro outros conjuntos de dados, as barras de erro foram utilizadas para visualização mais simples do espalhamento dos dados das reflectâncias BOA, usando um intervalo de confiança de 95%, assumindo distribuição não gaussiana.

### 3.2.2 Segundo teste – Linha de base e comparação

A intenção da criação de uma linha de base é saber quais são os valores ‘normais’ para cada ponto amostral, calculando a distribuição pela série histórica.

Todas as imagens classificadas como ‘limpas’ na criação da base de dados foram processadas pelos algoritmos Acolite e C2RCC, depois os valores foram extraídos nos pontos utilizados para comparação da base de dados, utilizando o mesmo método de extração explicado nas seções anteriores.

Foram selecionados três algoritmos para essa análise: C2RCC, MIP e Acolite. Como o Acolite tem um foco maior nos algoritmos relacionados à retrodifusão da luz solar na água, foram extraídos os valores de Turbidez (método Dogliotti, Ruddick, Nechad, Doxaran, & Knaeps, 2015), Sólidos Suspensos Totais (método Nechad, Ruddick, & Neukermans, 2009) e  $K_d(490)$  (método QAASW; Lee, Du, & Arnone, 2005)

Nos processamentos do C2RCC foi escolhido o parâmetro Clorofila-a. Por complicações, a linha de base para o algoritmo MIP não pode ser feita, portanto os valores foram comparados com os valores dos outros dois algoritmos. Os parâmetros do sistema MIP utilizado são todos os usados nos outros dois.

Os processamentos foram realizados sobre as 14 imagens utilizadas na comparação e os dados extraídos para cada ponto (773 em total), tendo as distribuições plotadas dos valores de linha de base (em formato de barras de erro) juntamente com os valores de cada um dos pontos. Os valores de RMSE (Raiz quadrada do erro-médio) e MAPD (Média Percentual Absoluta da Dispersão) foram calculados usando os valores das medianas da linha base no intuito de se verificar a variação total.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram separados por cada objetivo, seguindo a ordem especificada em cada método proposto na seção anterior.

#### 4.1 Base de dados

A seguir serão apresentados os resultados da criação da base de dados fundamentada nas imagens orbitais, juntamente com as discussões respectivas para cada item.

##### 4.1.1 Imagens

Foram baixadas um total de 175 imagens para a extração dos pontos de criação, e separadas em três categorias conforme descrito na seção 3.1. Delas, apenas 125 foram utilizadas, sendo que 32 delas foram categorizadas como “limpas” pois não apresentarem nenhum fenômeno estudado. A TABELA 1 mostra a distribuição das imagens, por categoria (), ao longo do ano.

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS

		Total	Com Fenô- menos (2)	Descartadas (1)	“Limpas” (3)
2018	Maio	13	7	1	5
	Junho	12	8	1	3
	Julho	13	6	2	5
	Agosto	13	4	6	3
	Setembro	12	7	4	1
	Outubro	12	8	4	0
	Novembro	12	4	8	0
	Dezembro	12	8	3	1
2019	Janeiro	13	9	3	1
	Fevereiro	11	4	6	1
	Março	13	9	3	1
	Abril	12	9	2	1
	Maio	15	8	6	1
	Junho	12	2	1	9
Total		175	93	50	32

FONTE: O autor (2020).

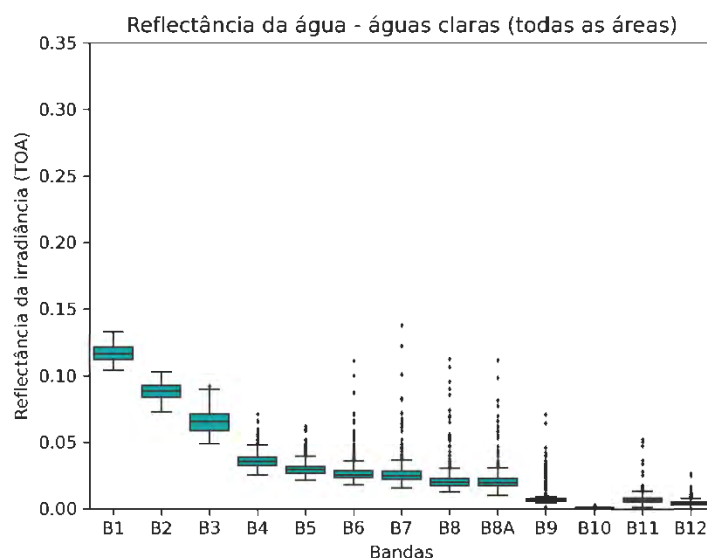
Como esperado, o maior número de imagens sem fenômenos foi identificado durante os meses mais secos na região. Analisando a distribuição de fenômenos por imagem, foi identificado que o efeito de brilho é predominante durante os meses de

setembro até fevereiro, aparecendo raramente nos outros meses. A hipótese é que o ângulo do sol relativo ao reservatório nesse período facilita a retrodifusão direta da luz solar em direção ao sensor.

#### 4.1.2 Resultados: Águas claras

As imagens categorizadas como imagens com poucos ou sem fenômenos tiveram seus pontos de amostragem gerados aleatoriamente para toda a extensão do reservatório (ver seção 3.1.3.1). O gráfico *box plot*<sup>1</sup> (GRÁFICO 3) representa a a variação da reflectância TOA das amostras, separadas pelas bandas do Sentinel-2, para todas regiões do reservatório nas imagens com águas claras. Um total de 950 amostras foram retiradas, distribuídas entre 32 imagens.

GRÁFICO 3 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA – ÁGUAS CLARAS (TODAS AS ÁREAS)



FONTE: O autor (2020).

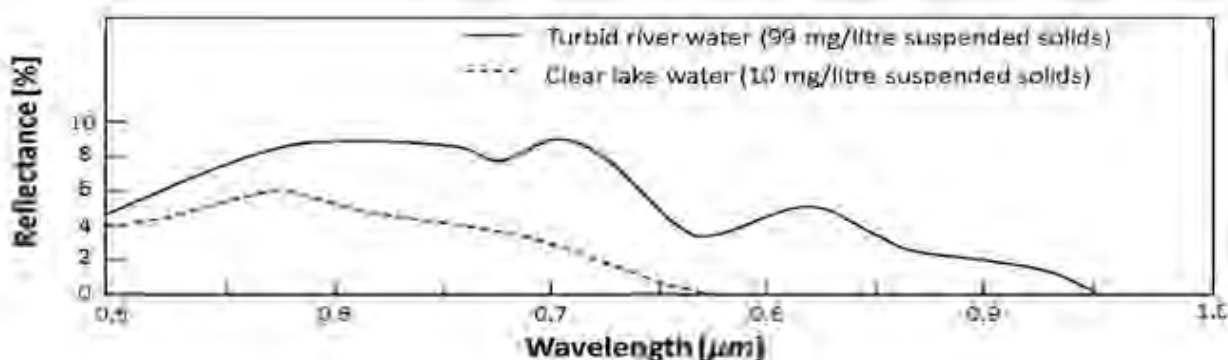
É possível observar que os valores são relativamente baixos, o que é de se esperar para as águas claras do reservatório. As taxas de absorção/transmitância da água para os comprimentos de onda mais baixos são elevadas – os valores altos apresentados no gráfico são devido à presença da atmosfera acima do corpo da água, predominante nas bandas 1 e 2, região espectral do azul (Mobley, 2020).

<sup>1</sup> Os valores do eixo Y foram fixados em 0.35 para efeitos de comparação com os outros gráficos.

Os outliers observados nas bandas do infravermelho possivelmente podem ser fruto da posição de pontos sobre fenômenos não identificados na separação das imagens.

Os espectros da superfície da água sem a presença da atmosfera podem ser encontrados na literatura, como mostrado por Malinowski, Groom, Schwanghart, & Heckrath (2015) no GRÁFICO 4:

GRÁFICO 4 – DIFERENÇAS DE REFLECTÂNCIA EM DOIS CASOS DIFERENTES DE CLARIDADE DA ÁGUA

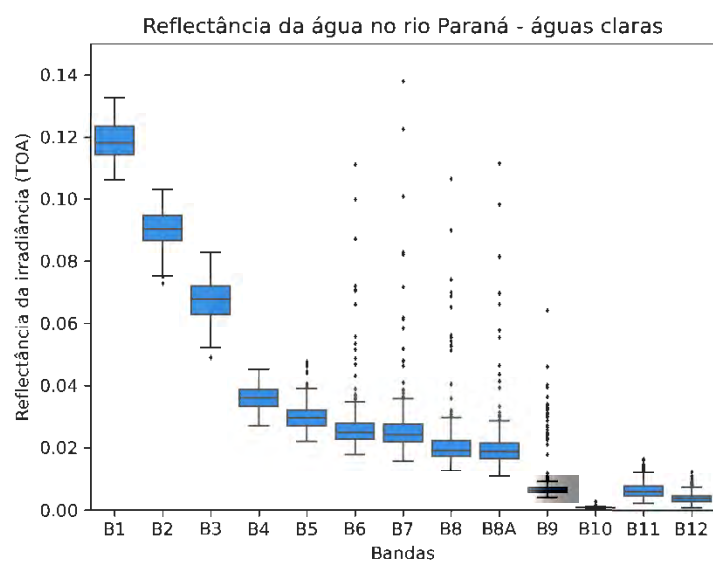


FONTE: Malinowski et al. (2015).

As águas do reservatório são predominantemente pouco turvas (valores abaixo de 10 NTU e de sólidos suspensos abaixo de 10 mg/l), podendo se comparar os valores na linha pontilhada da imagem acima a partir dos comprimentos de onda maiores que 600~700nm, onde a influência da atmosfera na reflectância da irradiância TOA deixa de ser predominante (Mobley, 2020).

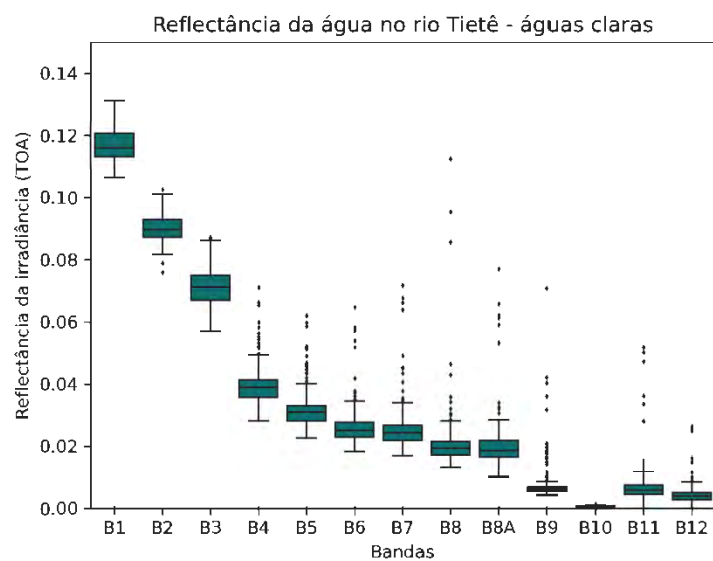
Foram também comparadas as distribuições das amostras separadas para cada rio componente do reservatório, no intuito de investigar se os comprimentos de onda entre as diferentes águas se diferenciam significativamente, conforme os gráficos GRÁFICO 5, GRÁFICO 6 e GRÁFICO 7 a seguir:

GRÁFICO 5 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO PARANÁ – ÁGUAS CLARAS



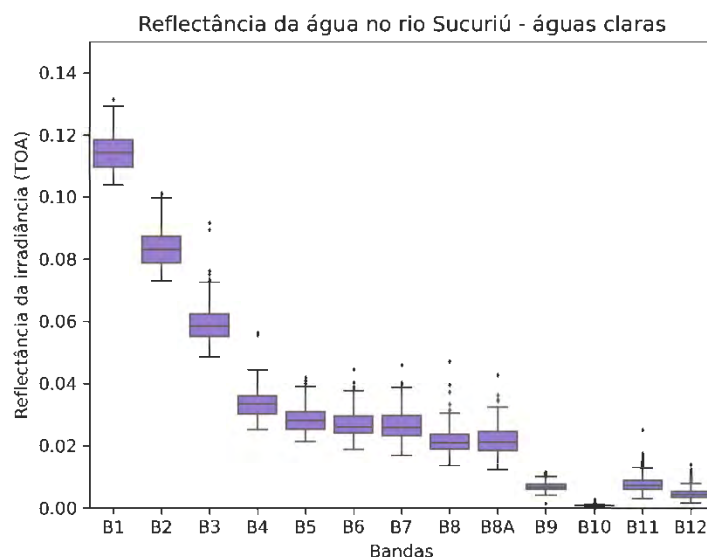
FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 6 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO TIETÊ – ÁGUAS CLARAS



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 7 – REFLECTÂNCIA DA ÁGUA NO RIO SUCURIÚ – ÁGUAS CLARAS



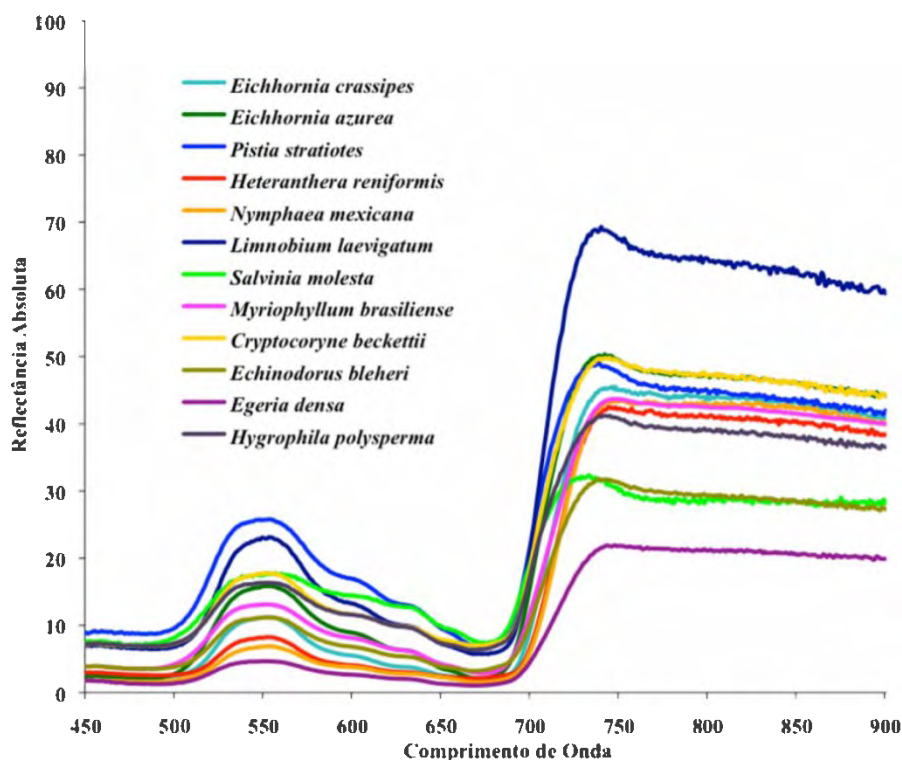
FONTE: O autor (2020).

É possível notar que a diferença entre as distribuições de reflectância não são muito significativas. O fator que possivelmente poderia influenciar esses valores, em águas sem outros fenômenos como brilho e vapor na atmosfera, seria a transparência da água.

No rio Sucuriú (braço oeste do reservatório), onde os valores de turbidez são levemente mais elevados (LACTEC, 2019), pode-se perceber que a variação dos dados entre as bandas 5 e 8A tem valores superiores. Em contrapartida, os valores da banda 3 e 4 no rio Tietê são maiores, o que possivelmente é influência das macrófitas aquáticas ou apenas da concentração de clorofila na água. O GRÁFICO 8 abaixo mostra um exemplo da resposta espectral de algumas espécies de plantas aquáticas:



GRÁFICO 8 – CURVAS ESPECTRAIS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS



FONTE: Aparicio & Bitencourt (2015).

LEGENDA: Resposta espectral de algumas espécies de macrófitas aquáticas. Na área de estudo, a *Egeria densa* é a submersa predominante e a *Eichhornia crassipes* é a flutuante predominante.

A diferença entre as reflectâncias não seria significativamente suficiente para afetar qualquer análise sobre os pixels de água no reservatório. Essa afirmação é feita baseando-se nos resultados a serem apresentados a seguir, os outros fenômenos parecem ter um impacto maior do que pequenas diferenças de concentrações de sólidos na água.

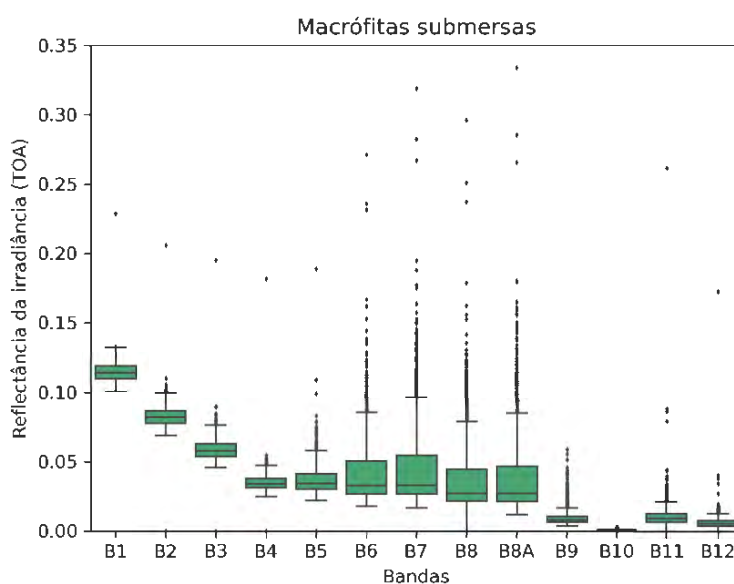
#### 4.1.3 Resultados: Imagens com fenômenos estáticos detectados.

Os pontos dessas amostras foram coletados com o auxílio de ferramenta GIS e informações obtidas em campo para os fenômenos de natureza estática ou semi-estática no reservatório, descritos na **seção 3.1.3.2**. As distribuições para cada fenômeno foram extraídas sobre as 32 imagens classificadas “limpas”, resultando num total de 3312 amostras distribuídas entre as imagens.

#### 4.1.3.1 Macrófitas Submersas

O GRÁFICO 9 a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras em áreas com a presença de macrófitas submersas, resultado de um total de 1692 amostras.

GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS MACRÓFITAS SUBMERSAS

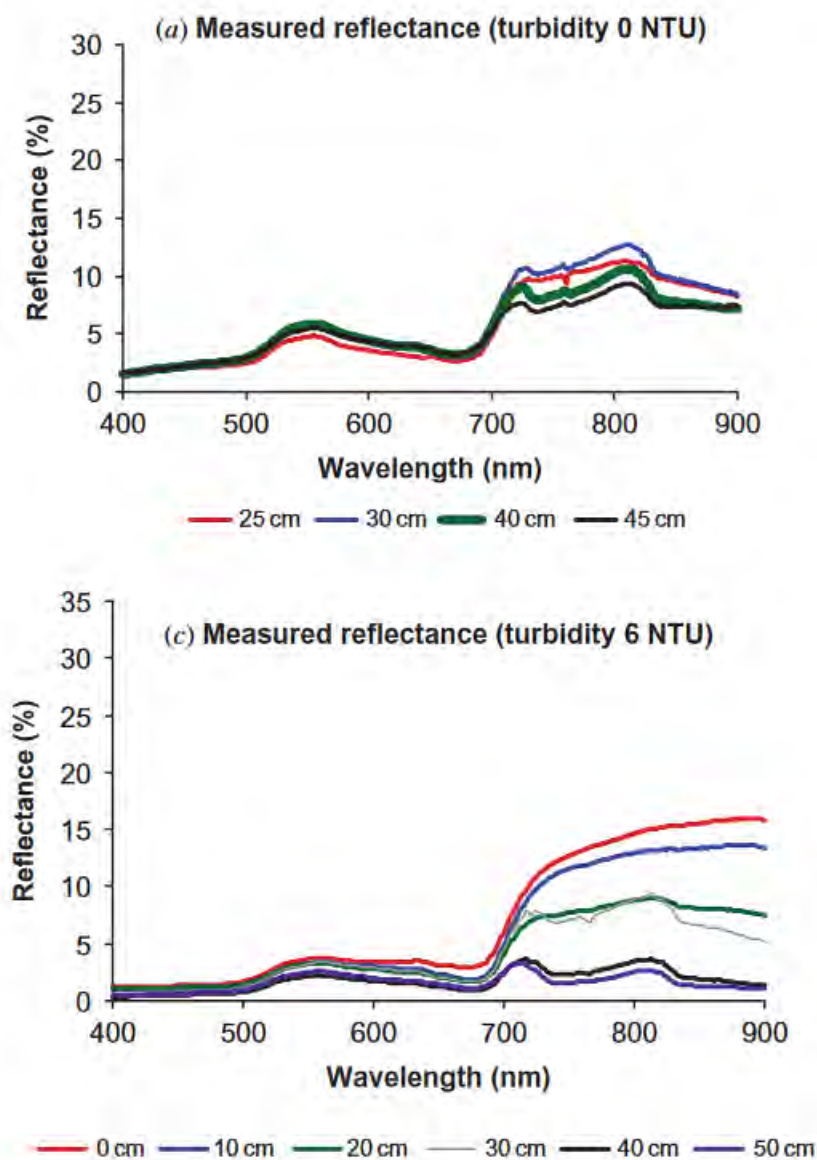


FONTE: O autor (2020).

Quando comparado com valores de águas claras, o acréscimo nos valores das bandas infravermelhas fica evidente. A relativamente alta dispersão nas bandas do infravermelho (além dos outliers) próximo pode ser explicada pela diferença de reflectância da superfície da água para as diversas profundidades da floração das macrófitas. Conforme dados cedidos pela concessionária que opera o reservatório, os valores do nível da água flutuam em ordem de centímetros ao longo do ano – o que leva a conclusão de que a profundidade das plantas em relação ao nível da água é o que pode causar as mudanças nos valores de reflectância. Além disso, há flutuações nos períodos de crescimento das plantas (LACTEC, 2019). Uma análise mais aprofundada sobre a sazonalidade seria necessária para poder reforçar essa afirmação.

O gráfico abaixo (GRÁFICO 10) de Cho & Lu (2010) mostra a diferença de reflectância da água com diferentes profundidades de dosséis das plantas, em duas condições de turbidez.

GRÁFICO 10 – CURVAS ESPECTRAIS DE MACRÓFITAS POR PROFUNDIDADE



FONTE: Cho e Lu (2010)

LEGENDA: Espectro de reflectância da água sobre dossel de plantas submersas *Myriophyllum aquaticum* e *Cabomba caroliniana*, para duas condições de turbidez e diferentes profundidades.

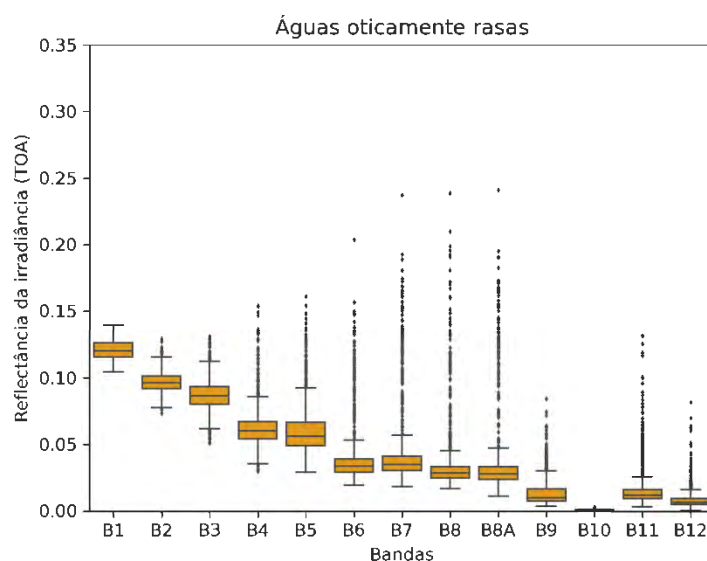
Nota-se que uma pequena alteração de turbidez na água (de 0 a 6 NTU) é suficiente para a reflectância das plantas mais profundas diminuir, e aumentara as das mais próximas a superfície.

Outro motivo pode ser a presença de plantas flutuantes, as quais não têm locais tão fixos quanto as plantas submersas e as plantas emergentes. As plantas flutuantes não têm a presença da água acima delas, então a retrodifusão da luz é direta. Porém, a presença dessas plantas nesse reservatório não é tão significativa quanto a das plantas aquáticas (LACTEC, 2019)

#### 4.1.3.2 Águas oticamente rasas

O gráfico (GRÁFICO 11) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas oticamente rasas, resultado de um total de 1044 amostras.

GRÁFICO 11 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS ÁGUAS OTICAMENTE RASAS



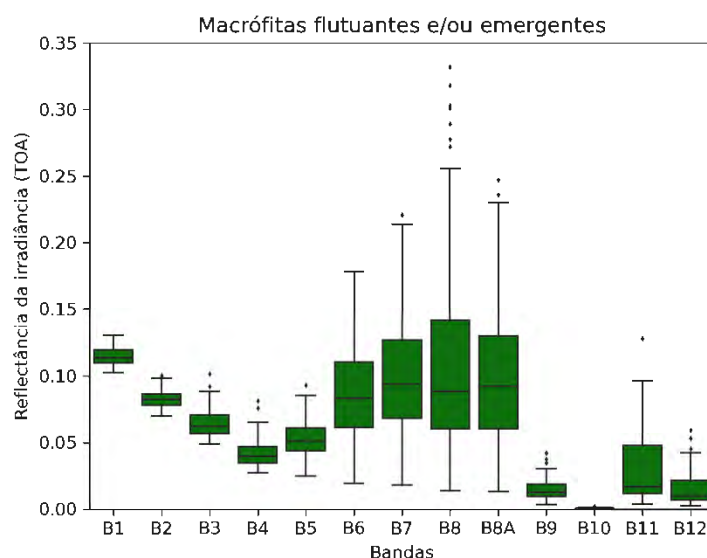
FONTE: O autor (2020).

Ao contrário das expectativas, os valores de reflectância das águas oticamente rasas não pareceram serem significativamente mais elevados que o das águas claras, porém a variação de fato ficou em valores mais elevados, além do grande número de outliers na região do NIR. Potencialmente, o número elevado de amostras tenha prejudicado os resultados.

#### 4.1.3.3 Macrófitas flutuantes/emergentes

O gráfico (GRÁFICO 12) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras em áreas com macrófitas flutuantes e/ou emergentes, resultado de um total de 360 amostras.

GRÁFICO 12 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS MACRÓFITAS FLUTUANTES E/OU EMERGENTES



FONTE: O autor (2020).

Conforme explicado anteriormente na seção 4.1.3.1, os valores mais elevados nas bandas do infravermelho são resultado direto da presença das plantas acima do nível da água.

#### 4.1.4 Resultados: Fenômenos de natureza não estática

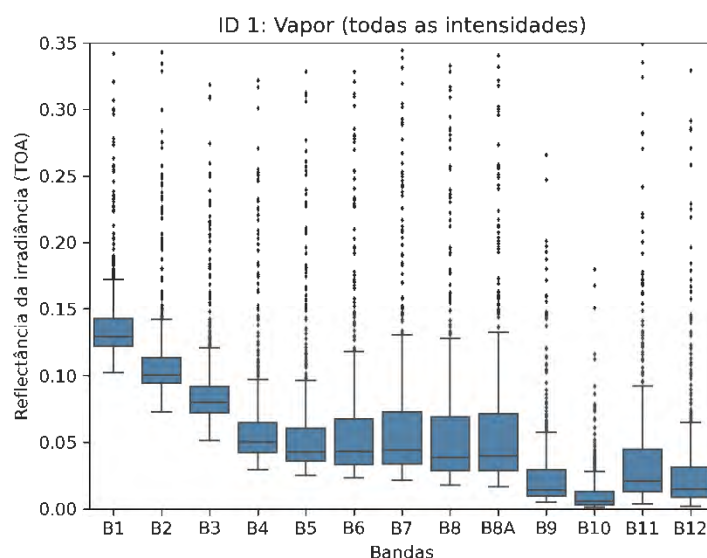
Os pontos dessas amostras foram coletados com o auxílio de ferramenta GIS e informações obtidas em campo para os fenômenos de natureza não estática no reservatório, descritos na **seção 3.1.3.3**. As curvas espectrais para cada

fenômeno foram extraídas sobre as 93 imagens classificadas na condição 2: “com fenômenos”; resultando num total de 1554 amostras distribuídas entre as imagens.

#### 4.1.4.1 Vapor na atmosfera

O gráfico (GRÁFICO 13) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo apenas vapor na atmosfera, resultado de um total de 677 amostras.

GRÁFICO 13 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE VAPOR NA ATMOSFERA PARA TODAS AS INTENSIDADES



FONTE: O autor (2020).

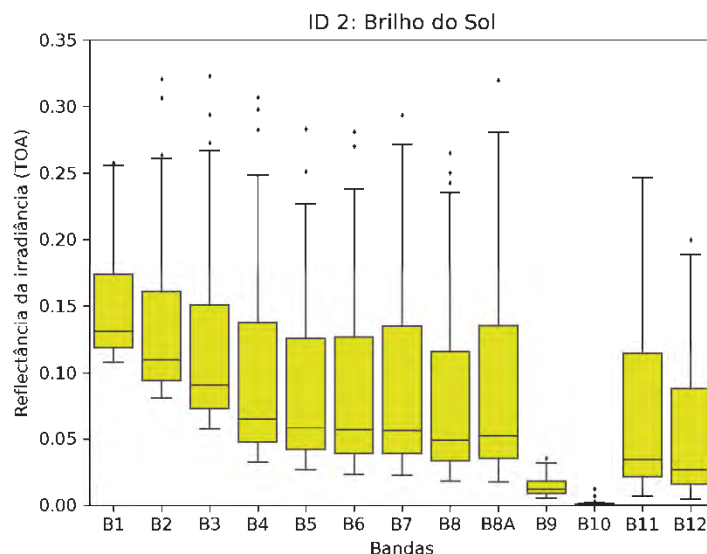
É possível ver uma forte assimetria das amostras tendendo a valores menores de reflectância, além de número elevado de outliers. Isso pode ser explicado pela natureza “caótica” desse fenômeno, que pode variar muito entre pixels (ver FIGURA 13).

Na seção 4.2 será tratado o quanto cada intensidade de vapor afeta alguns algoritmos – se há, talvez, uma necessidade de mascarar esses valores menores, os quais são mais expressivos e mais difíceis de detectar.

#### 4.1.4.2 Brilho do Sol na superfície da água

O gráfico (GRÁFICO 14) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo brilho do Sol na superfície da água, resultado de um total de 187 amostras.

GRÁFICO 14 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DO BRILHO DO SOL



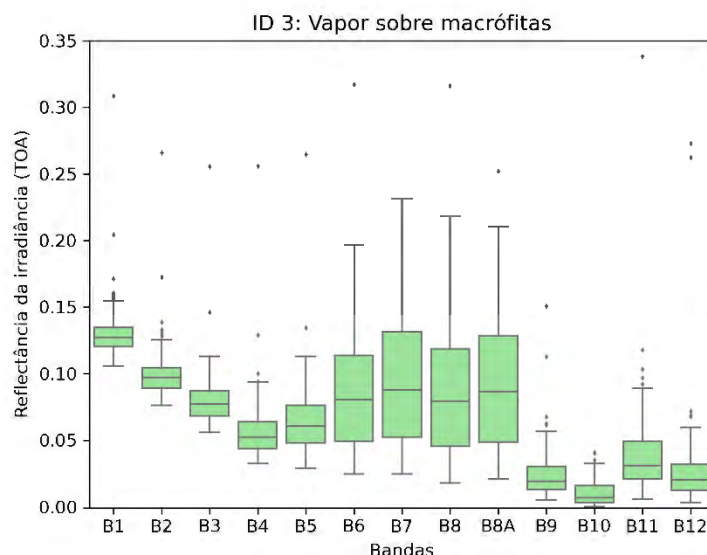
FONTE: O autor (2020).

A assimetria pode ser explicada pela variação de intensidades do brilho nas amostras – além de que o brilho mais intenso ocorre de forma mais rara. Não foi adotado nenhum método de classificar as intensidades nessa seção, pois o objetivo era entender a dimensão a variação. Na seção 4.2 foi investigado métodos de classificação da intensidade do brilho.

#### 4.1.4.3 Vapor na atmosfera e macrófitas

O gráfico (GRÁFICO 15) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo vapor na atmosfera sobre áreas com macrófitas submersas ou emersas, resultado de um total de 200 amostras.

GRÁFICO 15 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE VAPOR SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS



FONTE: O autor (2020).

Nota-se que aqui há uma tendência da variação das reflectâncias de cada fenômeno se somarem. As macrófitas por si só não refletem no comprimento de onda da banda 10 do sensor, porém quando combinados com o vapor na atmosfera esses valores se alteram. Os valores de reflectância na região do visível e a Banda 1 para as macrófitas são menores, demonstrando o fato que as plantas se apresentam mais “escuras” quando observadas nas imagens. Entretanto, para os dois fenômenos os valores nas bandas NIR e SWIR são mais elevados, como consequência a variação da soma dos dois fenômenos, nessas bandas, também se torna mais elevado.

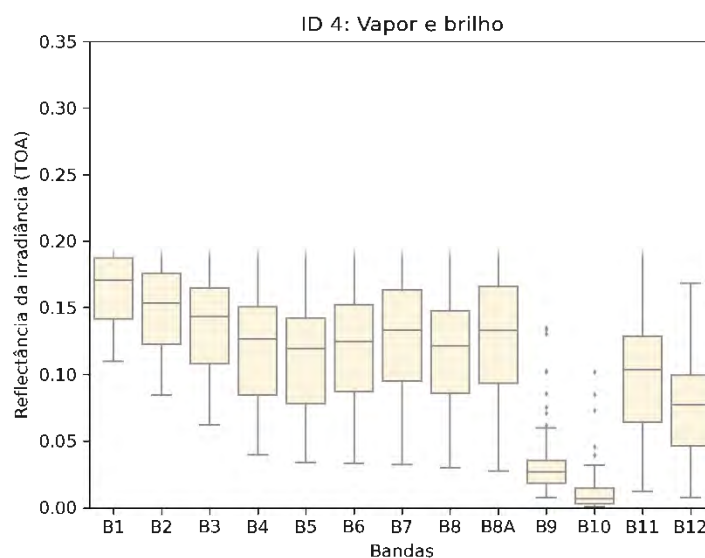
Não foram testados o vapor por diferentes espessuras sobre as macrófitas, pois parte-se do princípio de que as áreas com macrófitas devem ser evitadas de serem analisadas por qualquer algoritmo que não seja voltado para elas em específico. Uma forma de evitar análises sobre macrófitas sob vapor na atmosfera seria avaliar os valores de reflectância da banda 10.

#### 4.1.4.4 Vapor na atmosfera e brilho do Sol



O gráfico (GRÁFICO 16) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo vapor na atmosfera e brilho do Sol na superfície da água, resultado de um total de 188 amostras.

GRÁFICO 16 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DO VAPOR ACIMA DO BRILHO DO SOL NA ÁGUA



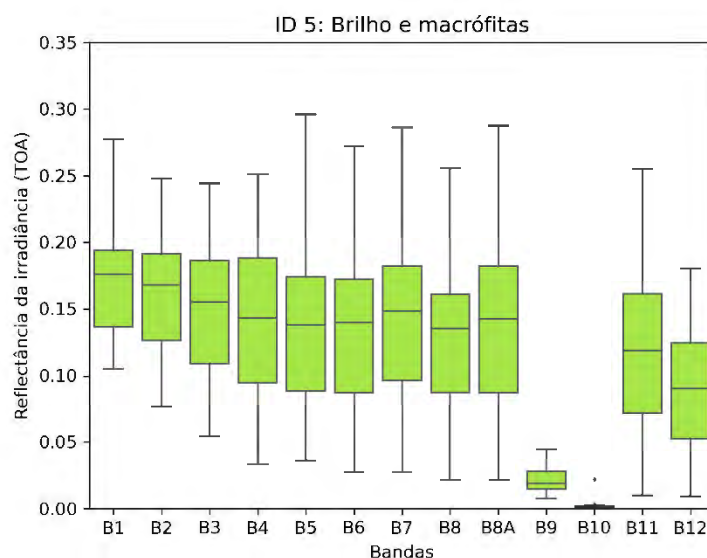
FONTE: O autor (2020).

Aqui também há uma tendência da variação das reflectâncias de cada fenômeno se somarem. Entretanto, os valores de vapor são baixos se comparados com os de brilho, tornando o vapor sobre brilho algo menos visível. A única diferença no caso seriam os valores na banda 10.

#### 4.1.4.5 Brilho do Sol e macrófitas submersas

O gráfico (GRÁFICO 17) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo brilho do Sol sobre a superfície da água com macrófitas submersas, resultado de um total de 51 amostras.

GRÁFICO 17 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE BRILHO ACIMA DE ÁREAS COM MACRÓFITAS SUBMERSAS



FONTE: O autor (2020).

Nota-se que aqui também há uma tendência da variação das reflectâncias de cada fenômeno se somarem. Os valores já elevados do brilho se somados com os das plantas ficam maiores ainda. Entretanto, o pouco volume de amostras encontradas pode invalidar essa afirmação:—Durante a coleta das amostras, foi notado que é raro a ocorrência de brilho sobre regiões com as plantas submersas, conforme mostra a figura (FIGURA 21 – ÁREAS COM MACRÓFITAS SEM BRILHO ACIMA) abaixo:

FIGURA 21 – ÁREAS COM MACRÓFITAS SEM BRILHO ACIMA



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: A jusante e a montante da ponte da rodovia SP-595 sobre o rio Tietê são lugares notórios por sua grande concentração de plantas, representada na figura pelos pontos.

Isso talvez pode ser explicado pelo fato que a corrente nas áreas com macrófitas é menos intensa (fator que ajuda em sua floração), resultando numa menor presença de ondas e, como consequência, maior a probabilidade de a retrodifusão da radiação eletromagnética ser mais difusa – diminuindo as chances de reflexão no ângulo relativo ao sensor.

Em um dos casos, foi notado que o contrário ocorreu – o brilho só era presente nas regiões chamadas de “berços” das plantas aquáticas – locais relativamente fechados onde há alta concentração delas. O motivo não foi investigado, mas amostras foram coletadas nessas áreas para servirem de referência, ilustradas na FIGURA 22.

FIGURA 22 – BRILHO APENAS SOBRE ÁREAS COM MACRÓFITAS

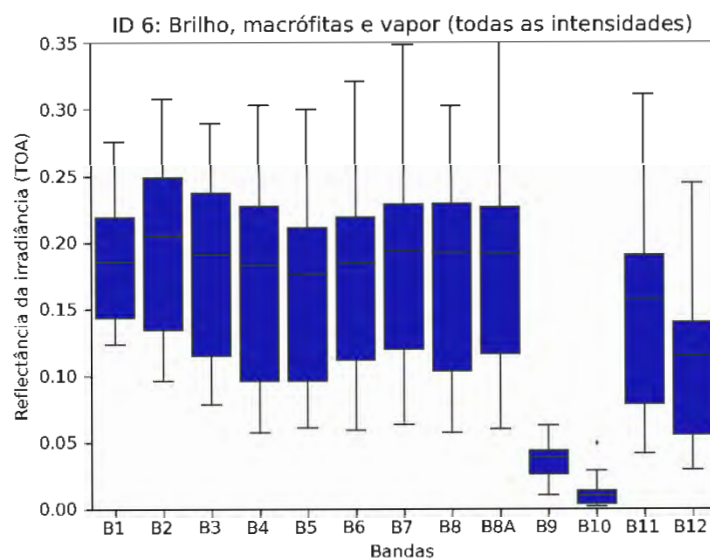


FONTE: O autor (2020).

#### 4.1.4.6 Vapor na atmosfera, brilho do Sol e macrófitas

O gráfico (GRÁFICO 18) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo vapor na atmosfera sobre águas com macrófitas submersas presentes e afetadas pelo efeito do brilho do Sol, resultado de um total de 36 amostras.

GRÁFICO 18 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DE BRILHO DO SOL, VAPOR E MACRÓFITAS



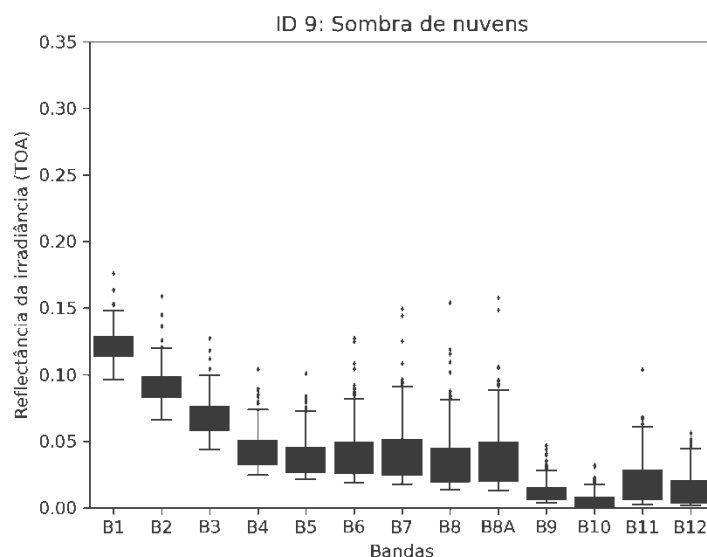
FONTE: O autor (2020).

Outro fenômeno raro que foi identificado, com valores de reflectância equiparáveis a pixels sobre terra. Verifica-se novamente os altos valores de reflectância nas bandas NIR e SWIR, causado pelos três efeitos, e os altos valores nas bandas do visível, causado em suma pelo brilho.

#### 4.1.4.7 Sombras de nuvens

O gráfico (GRÁFICO 19) a seguir mostra a extensão dos valores de reflectância para as amostras sobre áreas contendo sombra de nuvens acima da superfície da água, resultado de um total de 151 amostras.

GRÁFICO 19 – VARIAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS SOMBRAS DE NUVENS SOBRE A ÁGUA



FONTE: O autor (2020).

Esse fenômeno demonstrou-se como particularmente problemático. A expectativa é de que os valores em áreas com sombras de nuvem sejam menores que os de águas claras, seguindo a lógica de que as nuvens apresentam transmitância mínima para a luz solar nas regiões do visível, NIR e SWIR, como consequência uma menor quantidade de energia chega à superfície da água e é refletida. Entretanto, observa-se que as distribuições apresentam assimetria tendendo para valores menores. Foi identificado que há a possibilidade de ocorrência de vapor sobre as áreas com sombra de nuvens, explicado pelos valores da banda 10. Outro fator pode ser a presença de nuvens cirrus (alta altitude) acima da sombra das nuvens. Além disso, os valores de reflectância são similares aos valores de águas claras, podendo complicar futuras classificações.

#### 4.1.5 Comparação

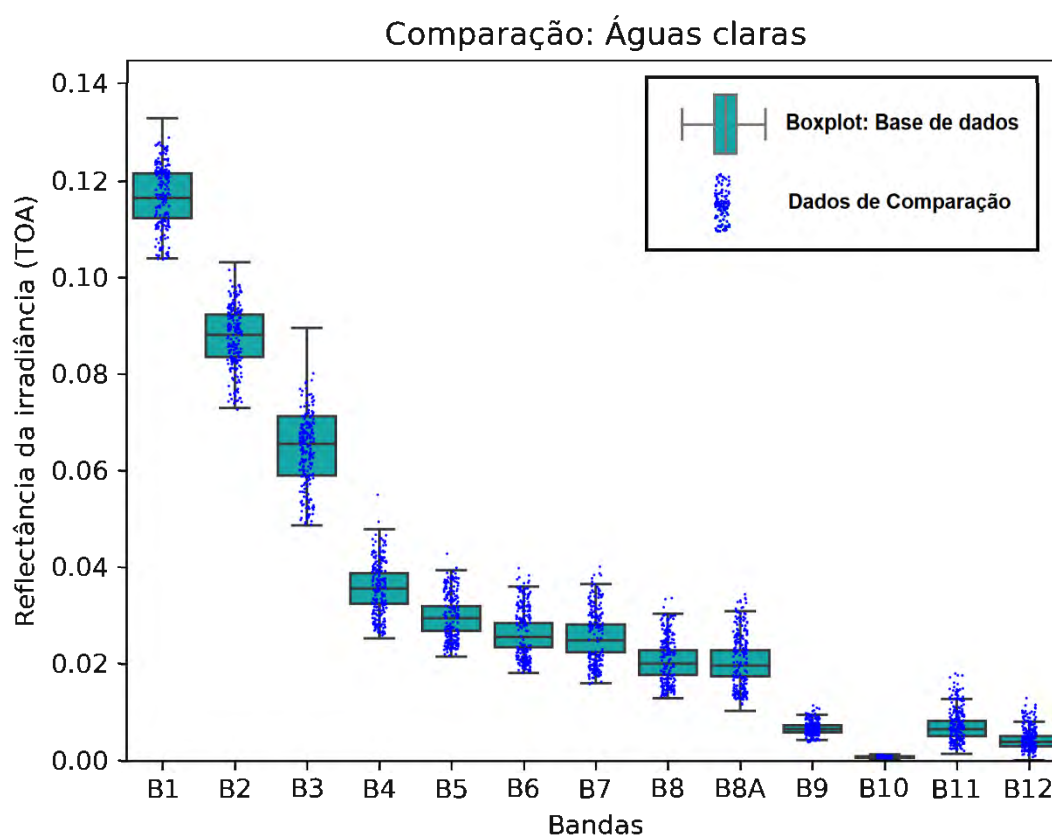
A criação dos pontos para a comparação da base de dados foi feita com os mesmos critérios de avaliação da criação, porém com imagens diferentes, conforme descrito na **seção 3.1.5**. A comparação foi feita sobre os fenômenos mais relevantes no que tange a análise ótica das águas continentais. A comparação não pode ser feita utilizando-se testes comuns como  $R^2$  devido à natureza não estática dos

fenômenos. Em contrapartida, os dados foram comparados a partir das suas distribuições.

#### 4.1.5.1 Águas claras

O gráfico (GRÁFICO 20) abaixo ilustra os resultados da comparação para as áreas consideradas como “limpas”, sem fenômenos que afetam a reflectância natural da água, resultado de 214 amostras.

GRÁFICO 20 – COMPARAÇÃO – SUPERFÍCIE DA ÁGUA EM IMAGENS ‘LIMPAS’



FONTE: O autor (2020).

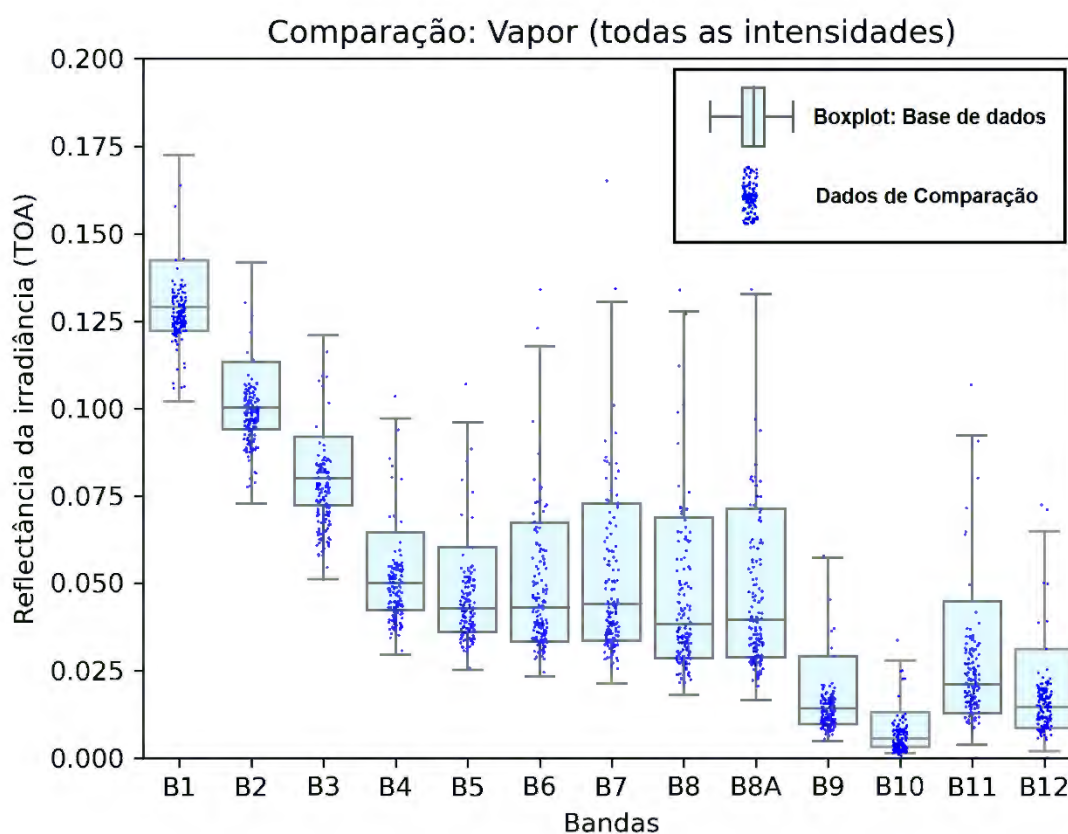
Os dados da validação se apresentam, em suma, dentro da variação da base de dados criada. Os valores mais elevados possivelmente são dados sobre imagens onde não foram identificados fenômenos existentes, além de serem de

ordem pequena em comparação com os outros fenômenos. A falta de amostras na base de dados também pode ser outro motivo.

#### 4.1.5.2 Vapor na atmosfera

O gráfico (GRÁFICO 21) ilustra os resultados da validação para as áreas afetadas por vapor na atmosfera acima da superfície da água, resultado de 139 amostras.

GRÁFICO 21 – COMPARAÇÃO – VAPOR



FONTE: O autor (2020).

Novamente, as distribuições de forma geral se apresentam de forma similar, com forte assimetria tendendo a valores menores nas bandas do infravermelho, salvo alguns outliers com valores maiores. Já havia sido identificado anteriormente que esse fenômeno se comporta de forma “caótica”, o que pode ser o motivo dos valores mais elevados.

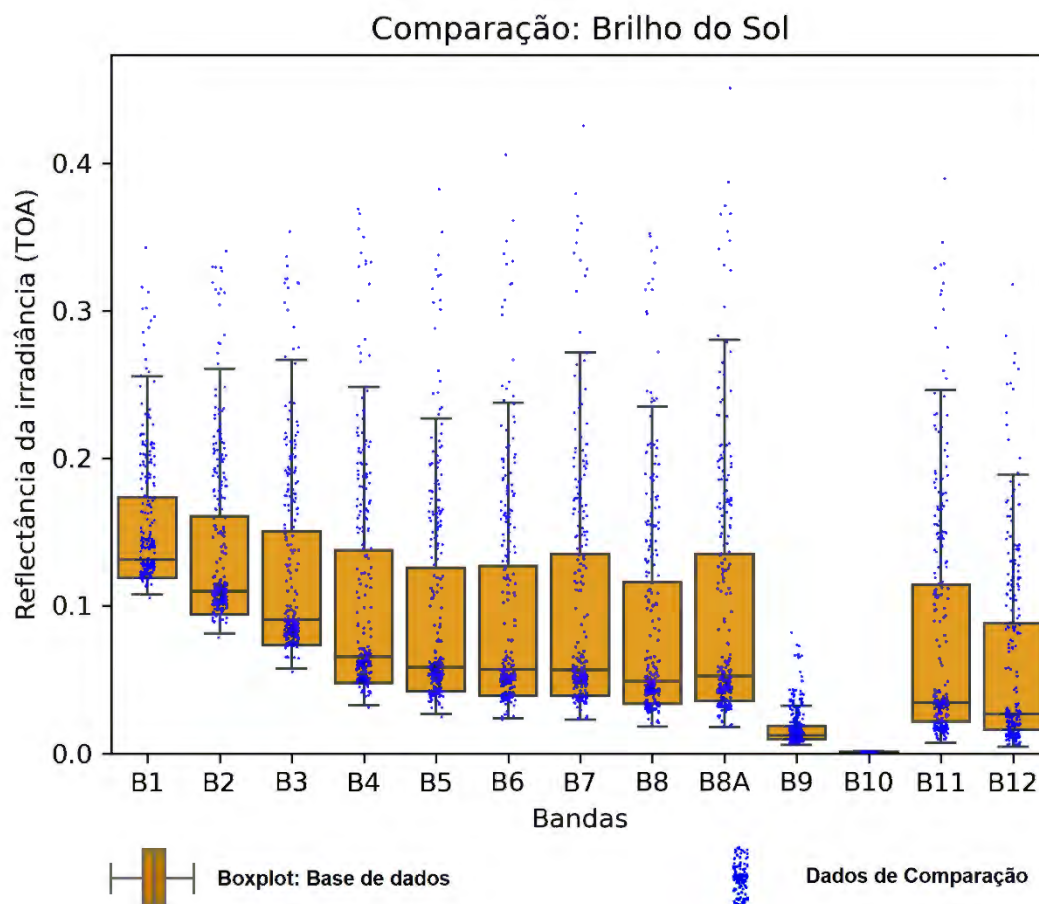


Para os casos mais extremos, diferentemente dos anteriores, há uma diferença maior das distribuições, entretanto a assimetria ainda tende a valores menores. Os valores limiares para cada categoria estabelecida para o vapor podem terem sido baixos, porém, como não havia valores de referência, isso não pode ser evitado. A questão a ser tratada é se essa classificação serve como referência para algoritmos que trabalham com a reflectância da água, o que será explorado na seção 4.2, se esses valores são suficientes para afetar a qualidade dos dados desses algoritmos.

#### 4.1.5.3 Brilho do Sol

O gráfico (GRÁFICO 22) abaixo ilustra os resultados da comparação para as áreas afetadas pelo efeito do brilho do Sol sobre a superfície da água, resultado de 237 amostras.

GRÁFICO 22 – COMPARAÇÃO – BRILHO DO SOL



FONTE: O autor (2020).

As distribuições novamente não apresentaram muitas diferenças, entretanto nesse fenômeno observou-se maior quantidade de dados acima dos valores da base de dados. O motivo é que foi encontrada uma imagem (FIGURA 23) com valores de brilho extremos, algo não visto nas imagens usadas para a criação da base de dados – o que mostra a limitação da série temporal utilizada. Os valores altos são em suma pontos coletados nessa imagem.

FIGURA 23 – CASO EXTREMO DE BRILHO DO SOL NO RESERVATÓRIO

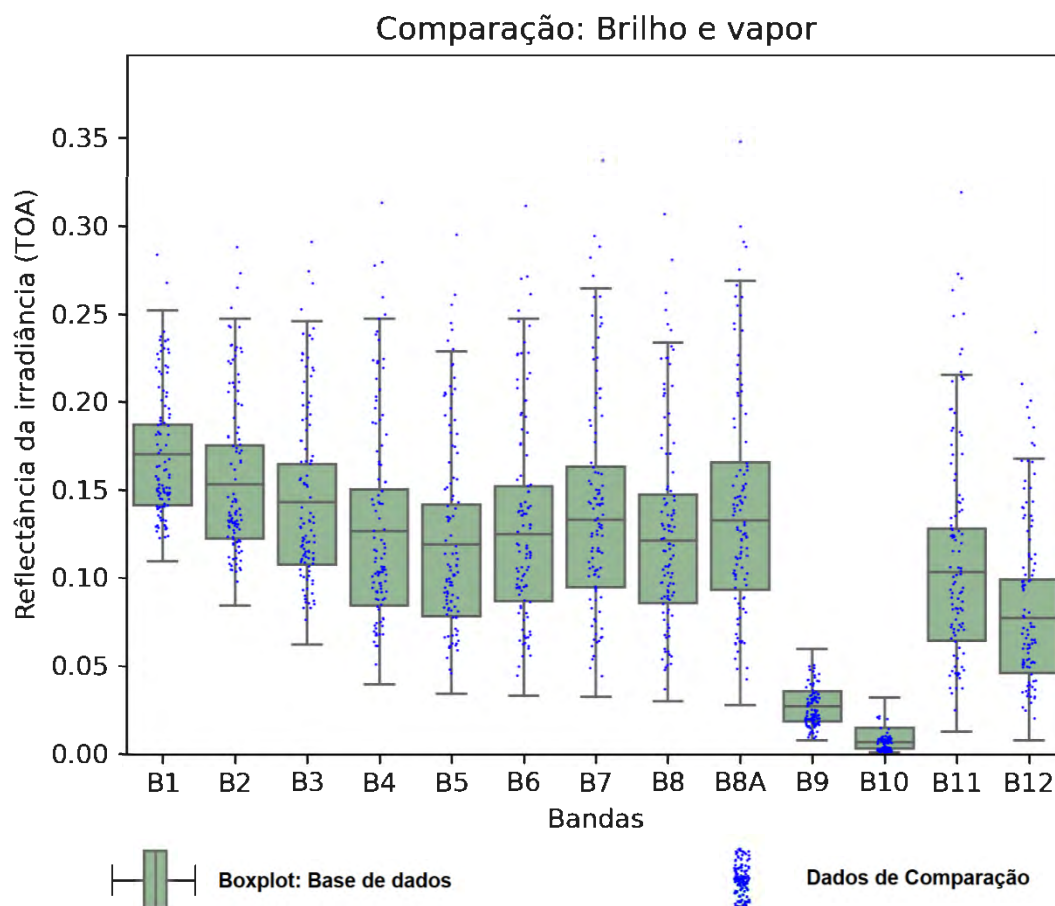


FONTE: O autor (2020).

#### 4.1.5.4 Brilho do Sol e vapor na atmosfera

O gráfico (GRÁFICO 23) abaixo ilustra os resultados da comparação para as áreas afetadas por brilho do Sol e vapor na atmosfera acima da superfície da água, resultado de 104 amostras.

GRÁFICO 23 – COMPARAÇÃO – BRILHO DO SOL E VAPOR NA ATMOSFERA



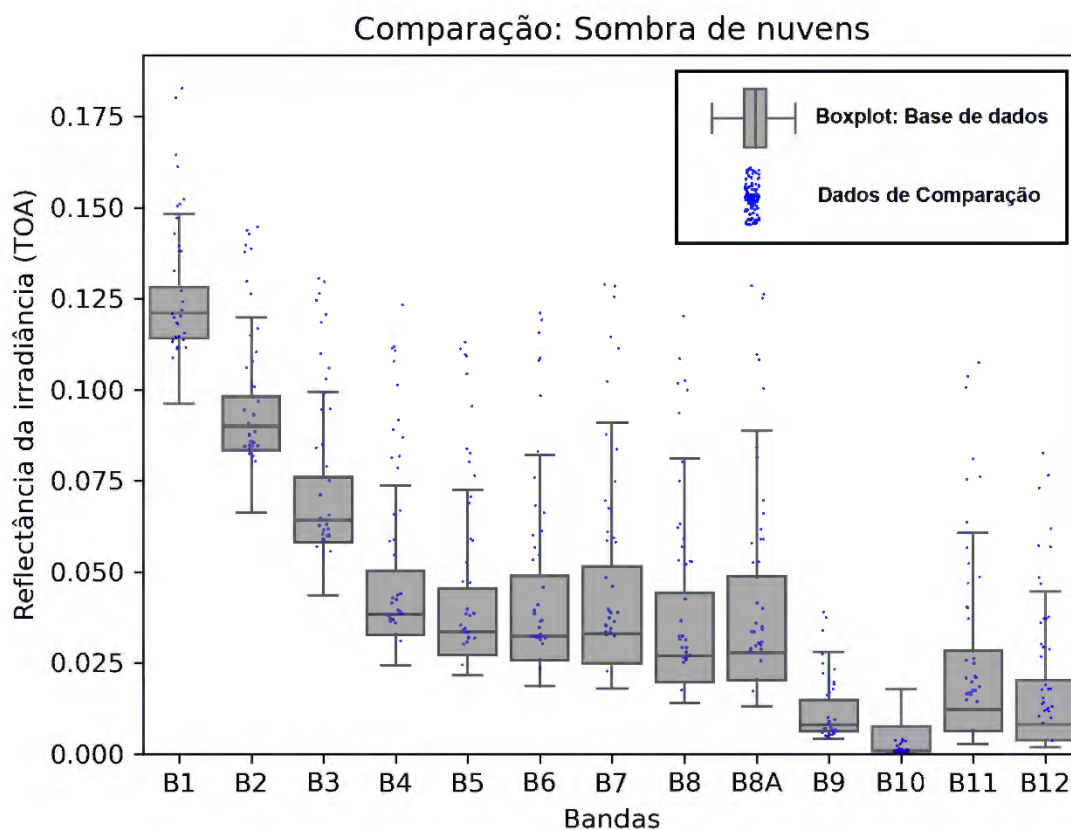
FONTE: O autor (2020).

Os valores aqui também apresentaram variação semelhante, entretanto observa-se que a assimetria em algumas bandas não é totalmente correspondente. Isso pode ser explicado pelo fato que existem diversas combinações de intensidades de brilho e espessura de vapor. Esse resultado é outro exemplo que mostra a limitação da série temporal utilizada para a criação da base de dados, ou até mesmo a falta de amostras.

#### 4.1.5.5 Sombras de Nuvens

O gráfico (GRÁFICO 24) abaixo ilustra os resultados da comparação para as áreas afetadas por sombras de nuvens acima da superfície da água, resultado de 33 amostras.

GRÁFICO 24 – COMPARAÇÃO – SOMBRAS DE NUVENS



FONTE: O autor (2020).

Como descrito anteriormente na seção 4.1.4.7, esse fenômeno tem vários fatores que podem alterar totalmente seu comportamento. Apesar dos pontos de comparação estarem 'dentro' da variação da base de dados, a assimetria não se mostra totalmente correspondente, principalmente nas bandas do infravermelho. Nesse caso, os fatores citados na seção 4.1.4.7 e/ou as limitações da série temporal e quantidade de amostras podem ser os motivos que afetaram a acuracidade dos resultados.

## 4.2 Implicações em algoritmos

O teste referente ao segundo objetivo visou identificar as implicações dos fenômenos naturais em exemplos práticos, em algoritmos de correção atmosférica e algoritmos que trabalham na identificação das AOPs e IOPs da água, e a

subsequente quantificação de valores de parâmetros indicadores de qualidade da água.

No primeiro teste foi identificado a diferença entre as distribuições das reflectâncias TOA presente na base de dados criada anteriormente, e as distribuições dos valores de reflectâncias BOA calculados por quatro algoritmos de correção atmosférica sobre as imagens utilizadas na comparação feita anteriormente.

No segundo teste foi analisado como os valores dos pontos de comparação, quando processados pelos algoritmos bio-óticos, se comportaram em relação os dados da série histórica de imagens sem efeitos visíveis (categoria x do item x).

A seguir os resultados para cada um dos parâmetros em comparação com cada fenômeno.

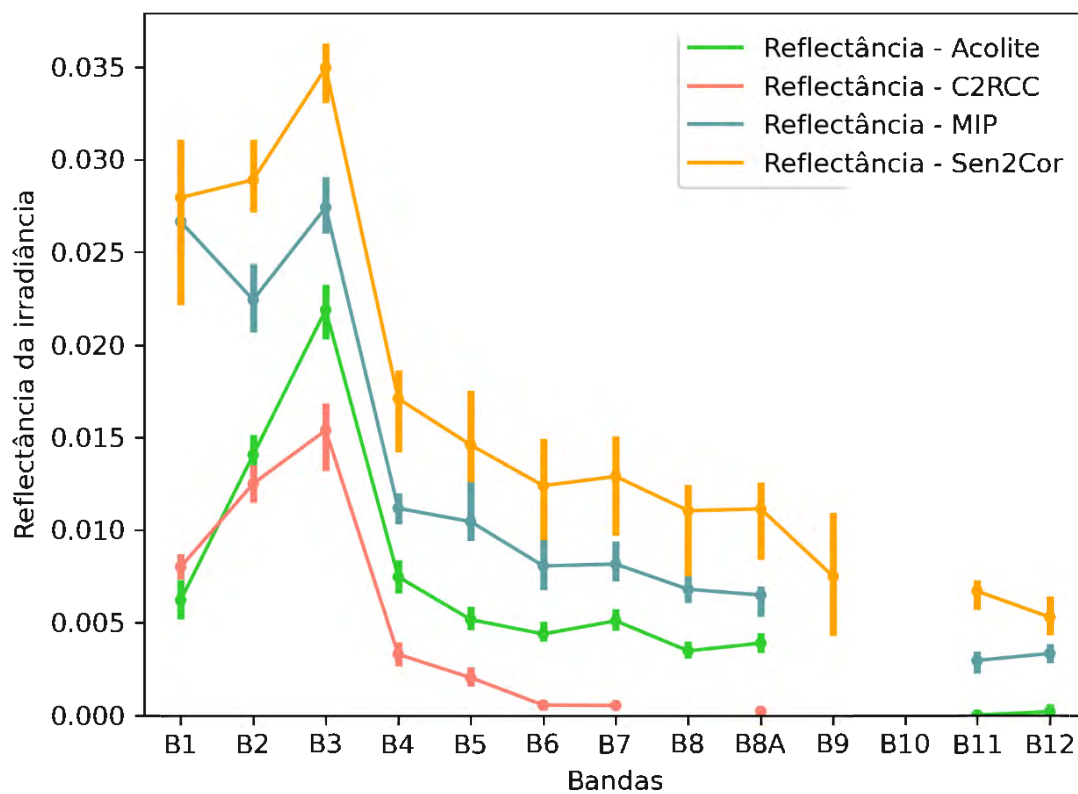
#### 4.2.1 Primeiro teste – comparação das reflectâncias TOA e BOA

Foi verificado que as distribuições dos dados, em sua maioria, não eram gaussianas, portanto, nenhum teste paramétrico foi realizado. Apenas valores de quartis e mediana foram analisados, utilizando intervalo de confiança de 95%. Cinco fenômenos foram comparados para quatro diferentes algoritmos, conforme descrito na seção (metodologia). Por complicações, não foi possível desativar totalmente as máscaras do algoritmo MIP, portanto o número de amostras para esse algoritmo é menor na maioria dos casos.

##### 4.2.1.1 Águas claras

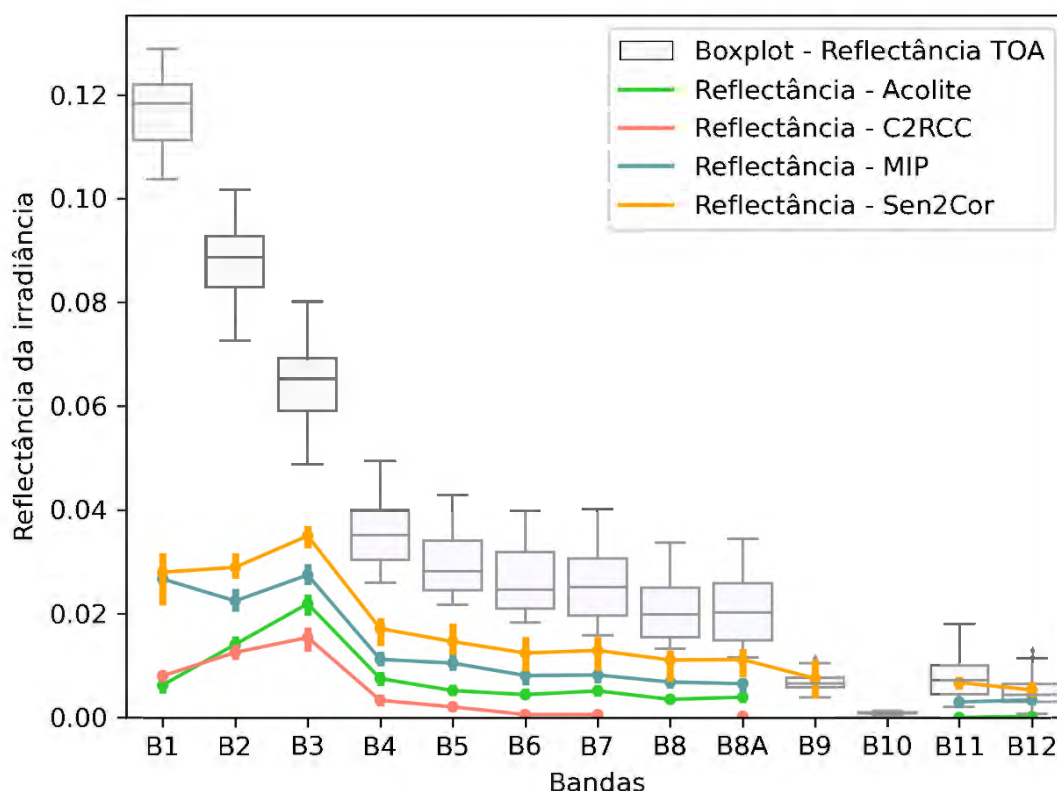
Conforme observado anteriormente, as áreas com águas claras apresentam baixa reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho. O GRÁFICO 25 e GRÁFICO 26 mostram os dados de reflectância da irradiância extraídos das imagens processadas.

GRÁFICO 25 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS ÁGUAS CLARAS



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 26 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS ÁGUAS CLARAS, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA



FONTE: O autor (2020).

Fica evidente que as influências atmosféricas são mais elevadas nos comprimentos de onda menores, porém ainda existentes nos comprimentos de onda do infravermelho, conforme descrito na seção 2.1.2. Conforme indicado no GRÁFICO 4, os valores de reflectância se apresentam similares com os valores de águas com baixa turbidez, porém menores devido a menor concentração de sólidos suspensos em geral no reservatório.

Visualizando-se as barras de erro, observa-se que o algoritmo que mais apresenta espalhamento é o Sen2Cor. Conforme mencionado anteriormente, este algoritmo não foi feito especificamente para lidar com corpos d'água, apesar de contar com uma ferramenta de correção do efeito de adjacência. Em teoria, a correção de adjacência deveria reduzir a influência dos pixels de terra nos de água (Kiselev, Bulgarelli & Heege, 2015), diminuindo os valores de reflectância principalmente na região do *red-edge* e do IR, ficando evidente que há uma diferença entre essa correção dos três algoritmos que a possuem (Sen2Cor, Acolite e MIP).

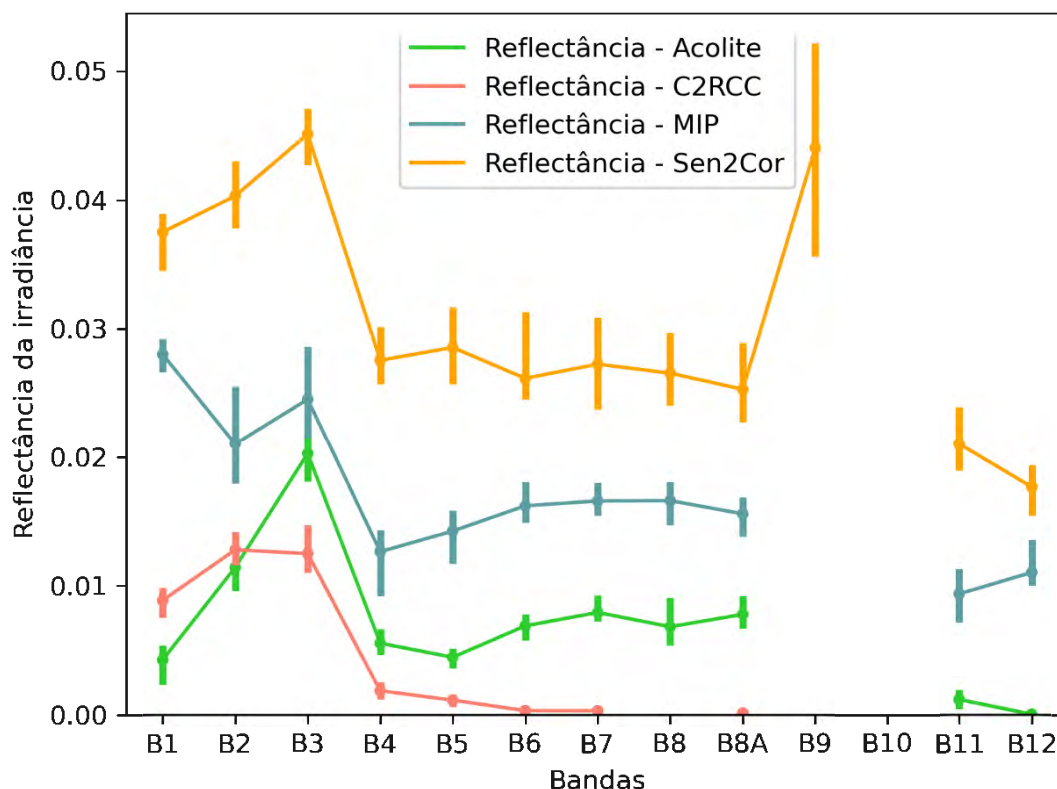


Apesar de serem métodos diferentes, o padrão das curvas das medianas é similar entre os algoritmos, com a exceção dos valores entre a banda 1 e a banda 2 do algoritmo MIP. Foi identificado que um erro no processamento da imagem de 07/20/2019 causou esta anomalia, portanto esses valores devem ser desconsiderados.

#### 4.2.1.2 Vapor na atmosfera

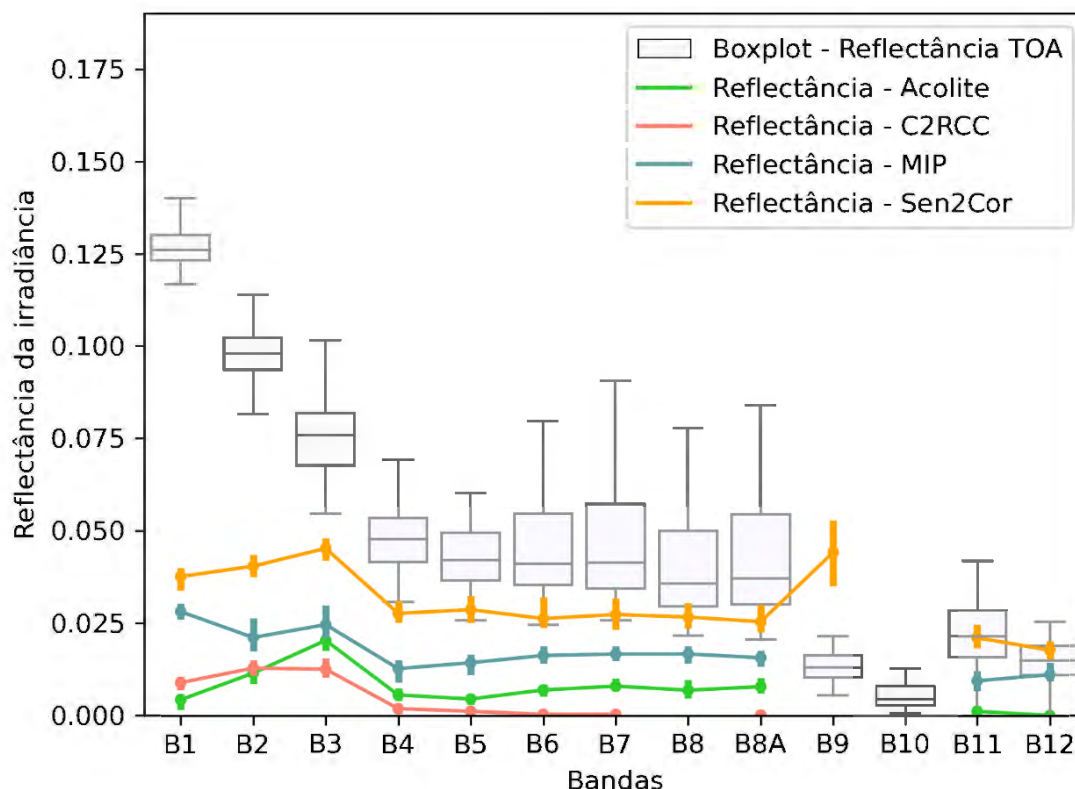
O GRÁFICO 27 e GRÁFICO 28 mostram os dados de reflectância da irradiância para o vapor na atmosfera extraídos das imagens processadas.

GRÁFICO 27 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 28 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA



FONTE: O autor (2020).

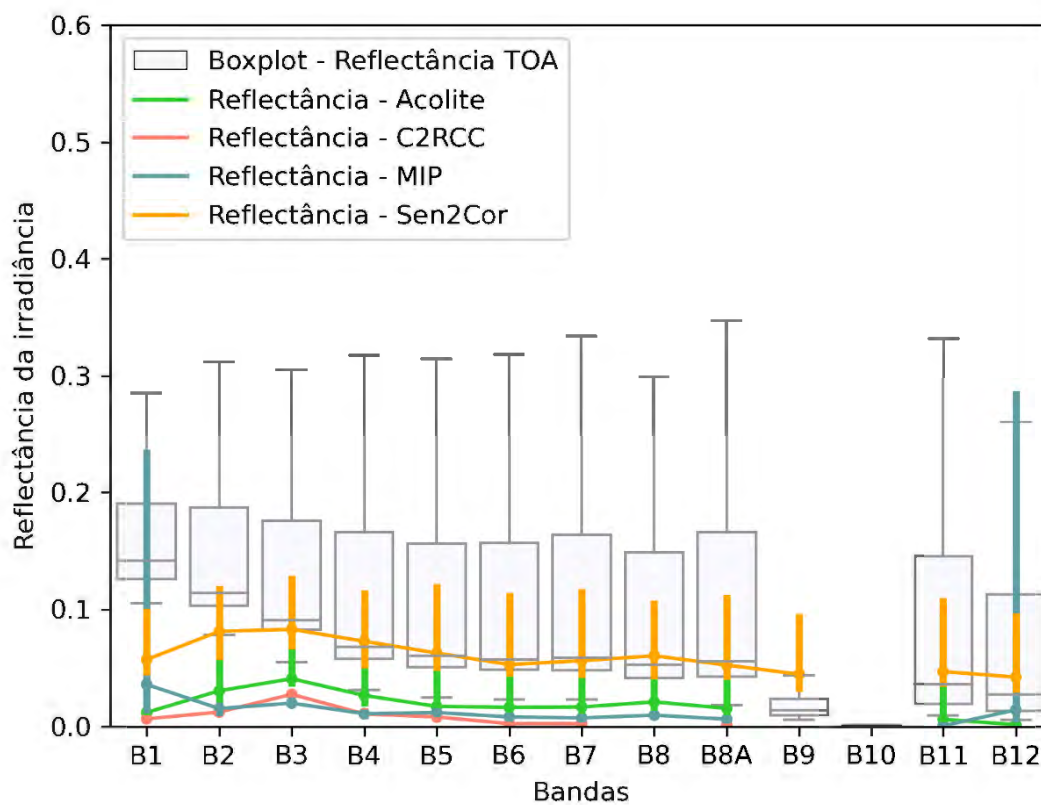
Com este efeito, o incremento esperado nas reflectâncias do infravermelho se faz presente, tendo uma curva levemente ascendente nos comprimentos de onda acima da banda 4. Entretanto, nas primeiras bandas os valores pouco se alteram se comparados com os valores de águas claras, estando relativamente na mesma variação. Isto é exceção para os valores extraídos das imagens do Sen2Cor, que apresentaram um incremento para todas as bandas se comparado com as imagens com águas claras.

No caso do C2RCC, os valores pouco se alteram, salvo os valores da banda 2. Para entender melhor o que isso realmente significa em etapas posteriores a correção atmosférica, o segundo teste foi realizado na seção 4.2.2.

#### 4.2.1.3 Brilho do Sol

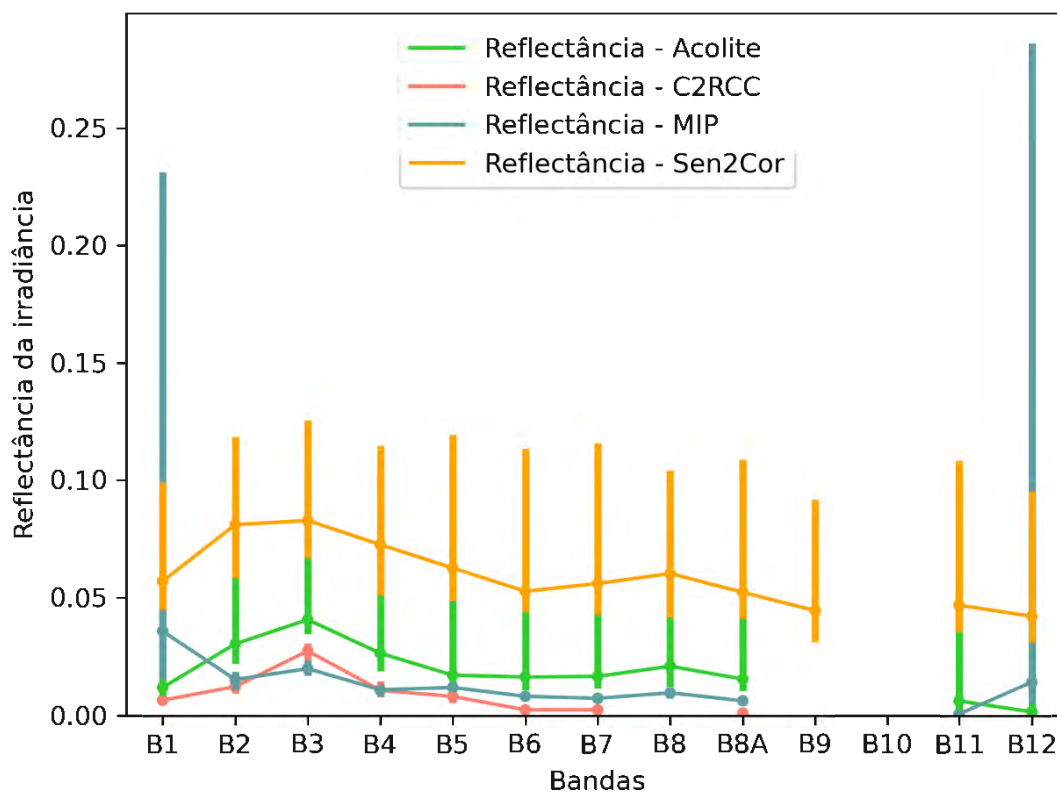
O GRÁFICO 29 e GRÁFICO 30 mostram os dados de reflectância da irradiância para o brilho do Sol extraídos das imagens processadas.

GRÁFICO 29 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O BRILHO



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 30 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O BRILHO, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA



FONTE: O autor (2020).

Apesar da correção do brilho estar presente nos algoritmos Acolite e MIP, os altos valores de reflectância ainda permanecem dentro do intervalo de confiança. Importante destacar que, como as máscaras do MIP não foram desabilitadas, o número de observações é menor que as dos outros algoritmos, esses valores correspondem aos pontos em que a correção de brilho foi aplicada, mas não foram mascarados – nesse caso, os pontos onde o brilho tem menos intensidade. A distribuição nas bandas 1 e 12 mostram que algumas anomalias ocorreram. Algumas imagens com quantidade extrema de brilho foram propositalmente escolhidas para verificar este comportamento.

Os valores dos pontos corrigidos pelo C2RCC apresentaram medianas mais elevadas se comparados com os outros dois fenômenos.

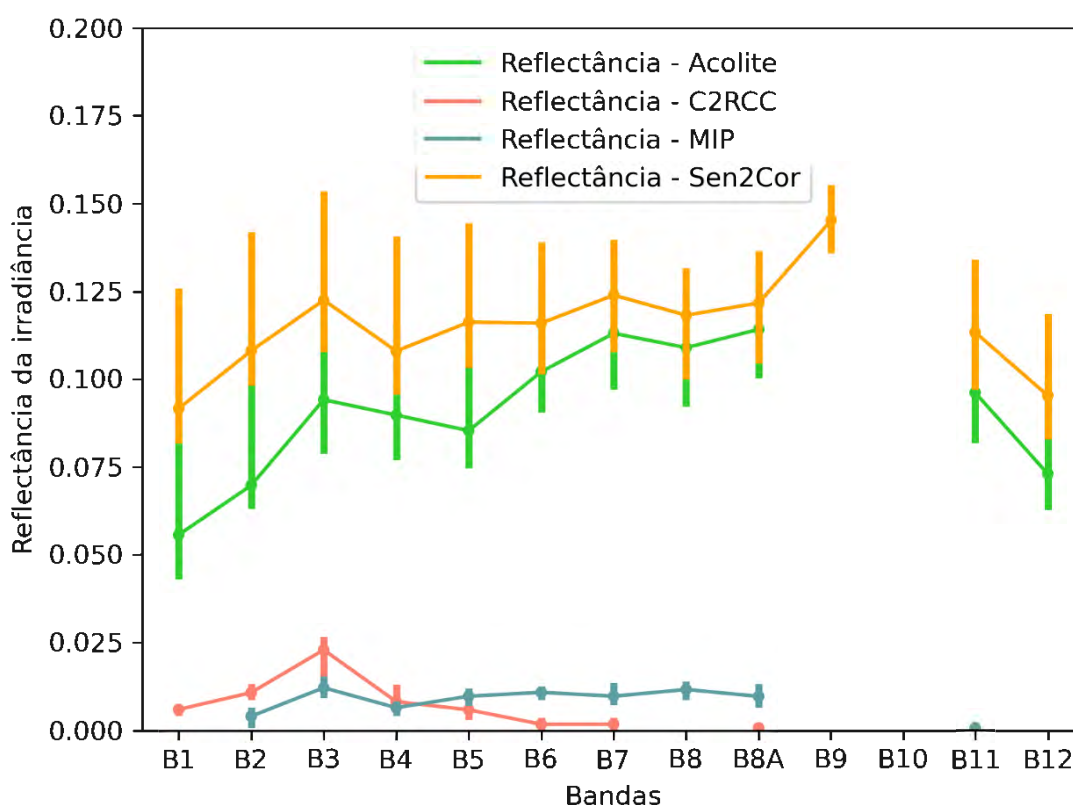
No caso do Sen2Cor, as medianas tiveram valores similares aos valores da base de dados, exceto nas bandas 1 e 2, onde há a maior influência da atmosfera na reflectância – devidamente corrigida pelo algoritmo.

Apesar de não existir um método específico para classificar as intensidades do brilho, é evidente que existe uma alteração nos valores de reflectância mesmo após a correção atmosférica, de adjacência e de brilho. Isso fica mais exposto no segundo teste realizado na seção 4.2.2.

#### 4.2.1.4 Brilho do Sol e vapor na atmosfera

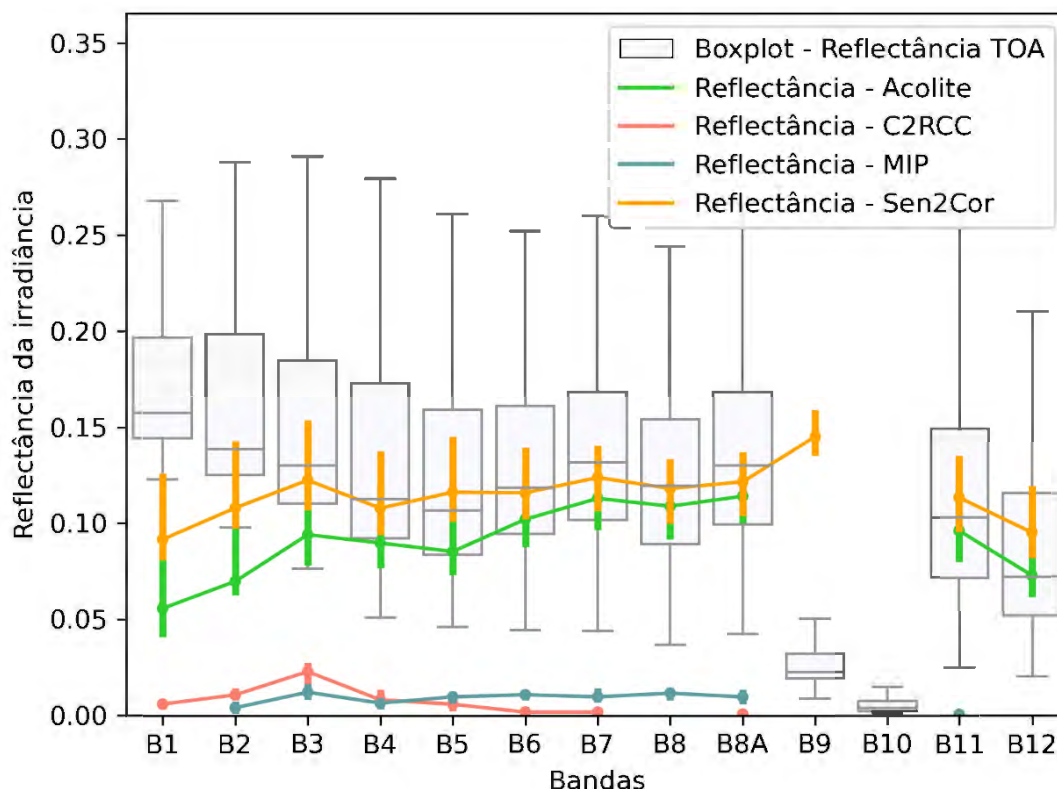
O GRÁFICO 31 e GRÁFICO 32 mostram os dados de reflectância da irradiância para o vapor na atmosfera e o brilho do Sol extraídos das imagens processadas.

GRÁFICO 31 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR E O BRILHO



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 32 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA O VAPOR E O BRILHO, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA



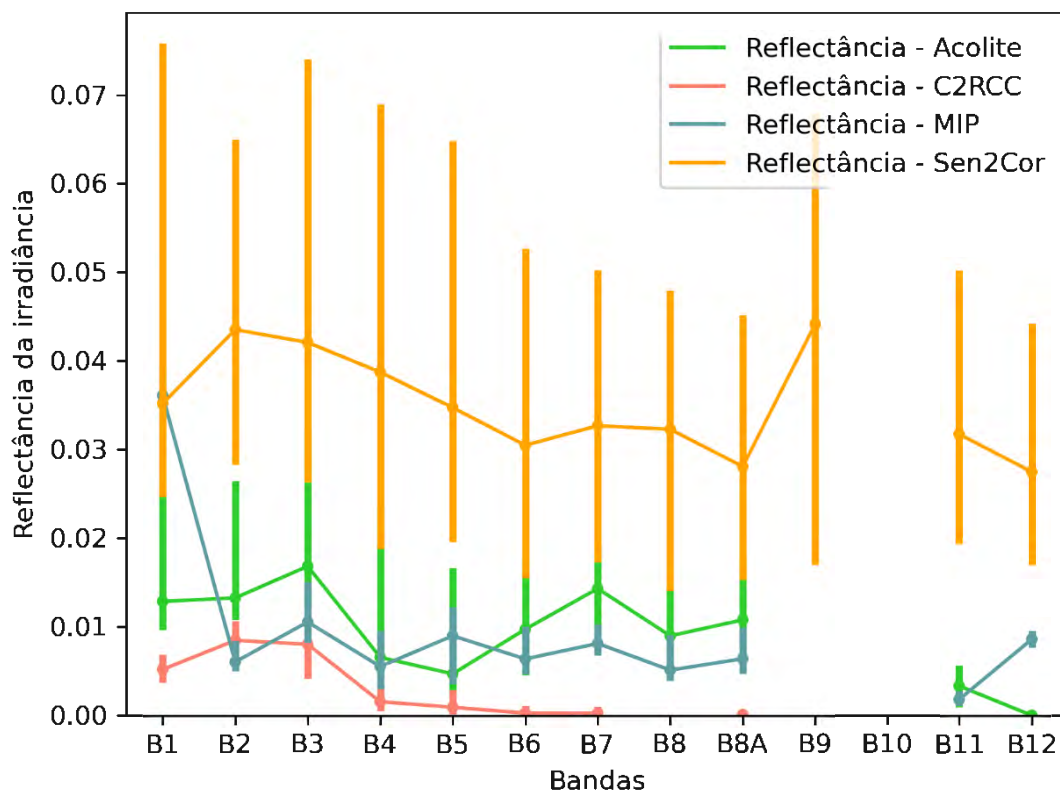
FONTE: O autor (2020).

Novamente, como esperado, os valores se elevaram em todos os casos. Apesar de parecer pequena a variação do C2RCC nos gráficos, ela ainda foi maior do que nos outros fenômenos anteriores. No algoritmo MIP, os valores principalmente da região do IR, foram mais elevados, além dos valores da banda 1 e banda 12 não terem sido processados. Por ser um fenômeno evidentemente problemático, a recomendação seria evitar usar os pixels com a combinação dos dois fenômenos. Essa afirmação se complementa novamente no segundo teste realizado.

#### 4.2.1.5 Sombras de nuvens

O GRÁFICO 33 e GRÁFICO 34 mostram os dados de refletância da irradiância para as sombras de nuvens extraídos das imagens processadas.

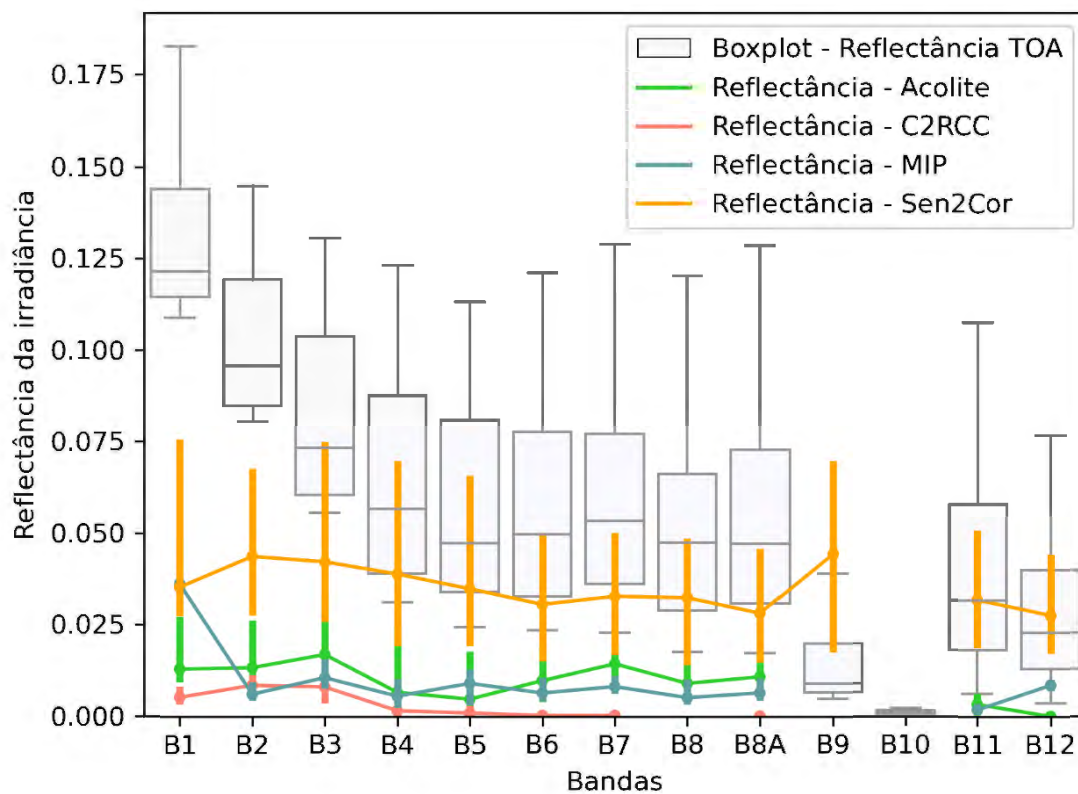
GRÁFICO 33 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA SOMBRAS DE NUVENS



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 34 – DISPERSÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS BOA PARA AS SOMBRAS DE NUVENS, COMPARADO COM REFLECTÂNCIA TOA

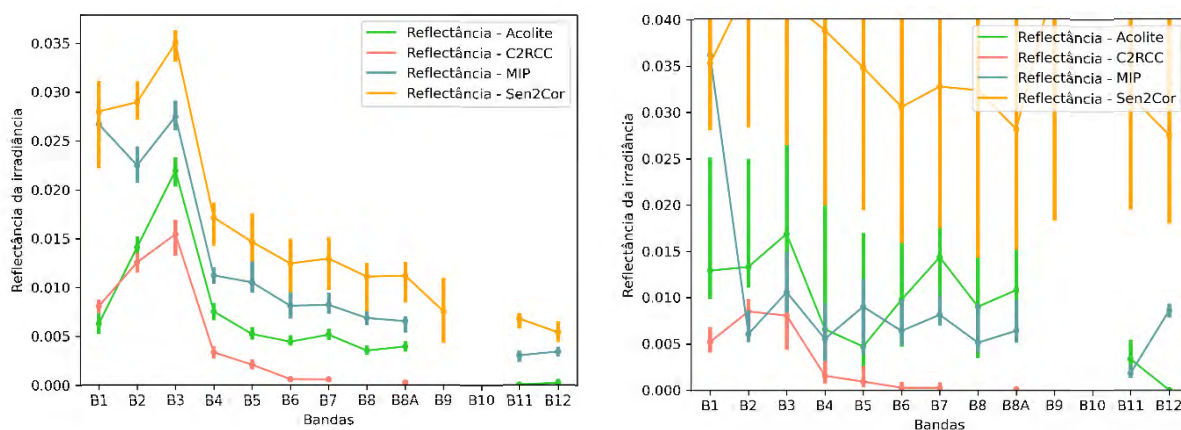




FONTE: O autor (2020).

Para efeitos de melhor visualização, os resultados foram plotados lado a lado com os resultados para águas claras, no GRÁFICO 35.

GRÁFICO 35 – COMPARAÇÃO – REFLECTÂNCIAS BOA DAS ÁGUAS CLARAS E SOMBRAS DE NUVENS





FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: À esquerda: Águas claras; à direita: sombras de nuvens.

Apesar das curvas não terem um padrão claro se comparadas entre si, os valores das medianas se apresentam menores se comparados com os valores normais. A expectativa é que os valores sejam menores. Isto ocorreu para os valores do MIP e do C2RCC, porém causou uma alta variação nos dados do Sen2Cor e no Acolite (em menor escala).

Julgando por valores na banda 10 dos dados de reflectância TOA, é possível que exista a presença de vapor acima das sombras de nuvens nas amostras, o que como visto na 4.1.4.1, pode ter efeitos em outros comprimentos de onda.

#### 4.2.2 Segundo teste – comparação com os algoritmos bio-óticos

Para uma análise mais detalhada, as 14 imagens de comparação foram processadas em alguns algoritmos bio-óticos, seus respectivos pontos de amostragem foram comparados com os valores de uma série histórica contando com imagens sem fenômenos visíveis (as utilizadas para a criação da base de dados). Para verificar as diferenças, testes estatísticos simples foram realizados entre a mediana dos dados históricos e os valores extraídos nas imagens de comparação.

Para os parâmetros  $K_d(490)$ , SST e Turbidez, os algoritmos Acolite e MIP foram utilizados. O parâmetro clorofila-a foi calculado nos algoritmos MIP e C2RCC.

Como não foi possível obter uma série histórica das imagens processadas pelo MIP, os pontos foram comparados apenas com a série histórica das imagens processadas pelo Acolite e pelo C2RCC.

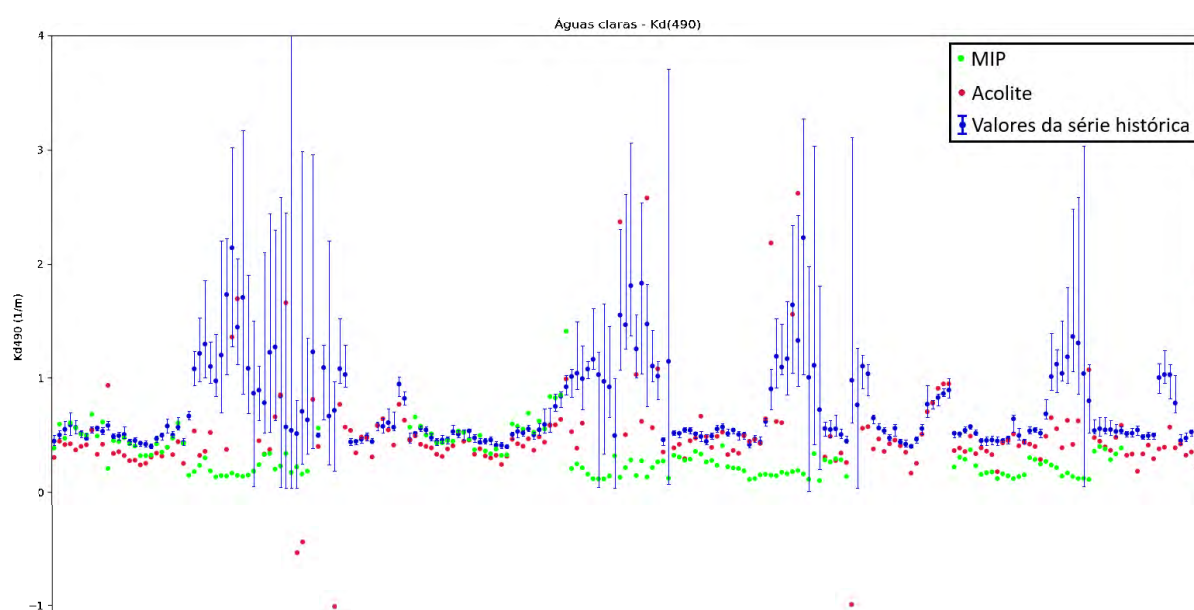
##### 4.2.2.1 Parâmetro $K_d(490)$

A TABELA 2 mostra os resultados de RMSE e MAPD para cada um dos fenômenos, incluindo o número de amostras (n). Como as máscaras do sistema MIP não puderam ser desativadas, o número de observações é menor.

TABELA 2 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO  $K_d(490)$

Fenômeno	Acolite			MIP		
	RMSE (1/m)	MAPD (%)	n	RMSE (1/m)	MAPD (%)	n
Águas Claras	0.595	40.731	190	0.636	49.772	163
Vapor	1.046	101.859	125	0.550	52.975	82
Brilho	3.292	292.812	226	0.189	15.176	79
Vapor e Brilho	2.884	342.656	104	-	-	-
Sombras de nuvens	0.876	96.715	31	-	-	-

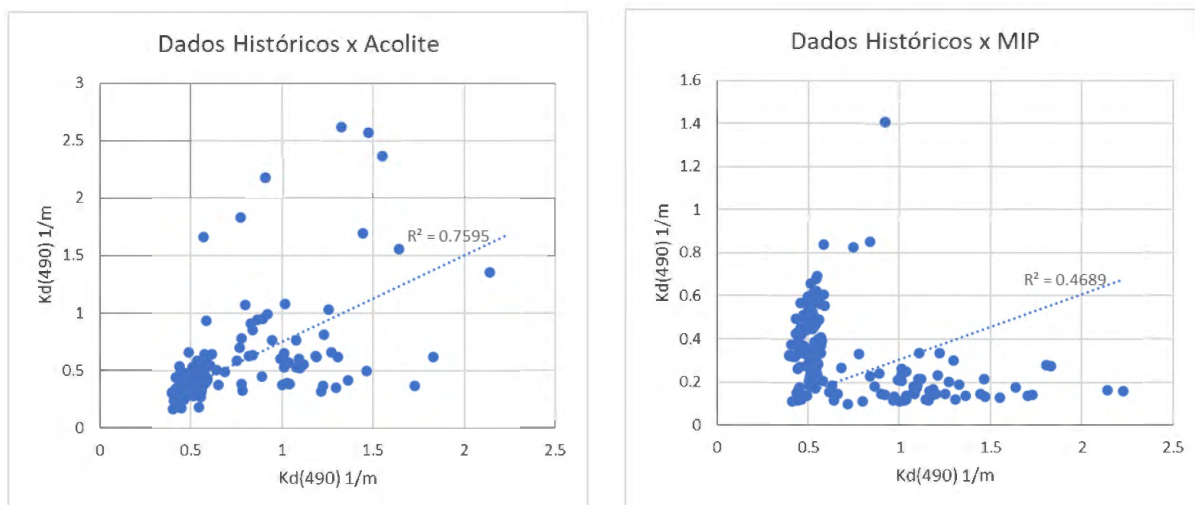
GRÁFICO 36 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO  $K_d(490)$



FONTE: O autor (2020).

O GRÁFICO 36 mostra os diferentes dados extraídos para as áreas com águas claras. Transformando o valor de  $K_d(490)$  para  $Z_{90}$ , os valores de RMSE são iguais a 1,6m para os dados do Acolite e 1,57m para o MIP de diferença de profundidade de penetração da luz. Os valores de desvio ficam em torno de 40 a 50%, sendo os do MIP maior. Observa-se padrões no posicionamento, principalmente nos pontos do Acolite, na maior parte dos pontos. Plotando os valores das medianas em um gráfico de dispersão essa diferença se evidencia, conforme o GRÁFICO 37:

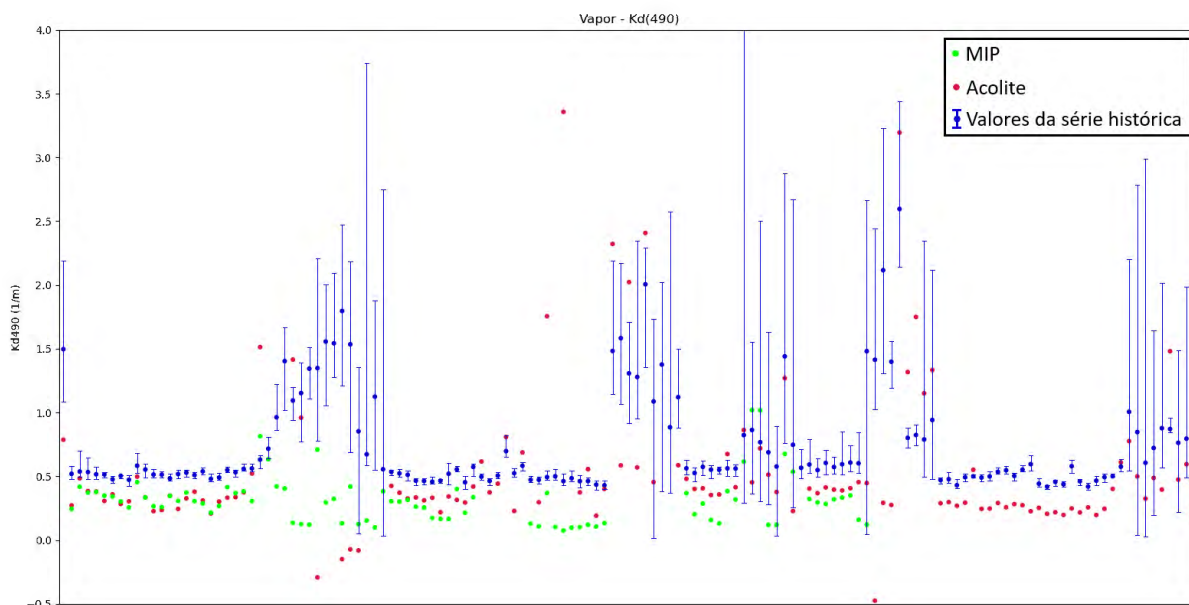
GRÁFICO 37 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO ACOLITE E MIP ( $K_d(490)$ )



FONTE: O autor (2020).

Em geral os valores dos pontos processados pelo MIP foram menores, ainda próximos às barras de erros da série histórica e sem uma variação drástica, como verificado na análise sobre os pontos com vapor na atmosfera (GRÁFICO 38)

GRÁFICO 38 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO KD(490)

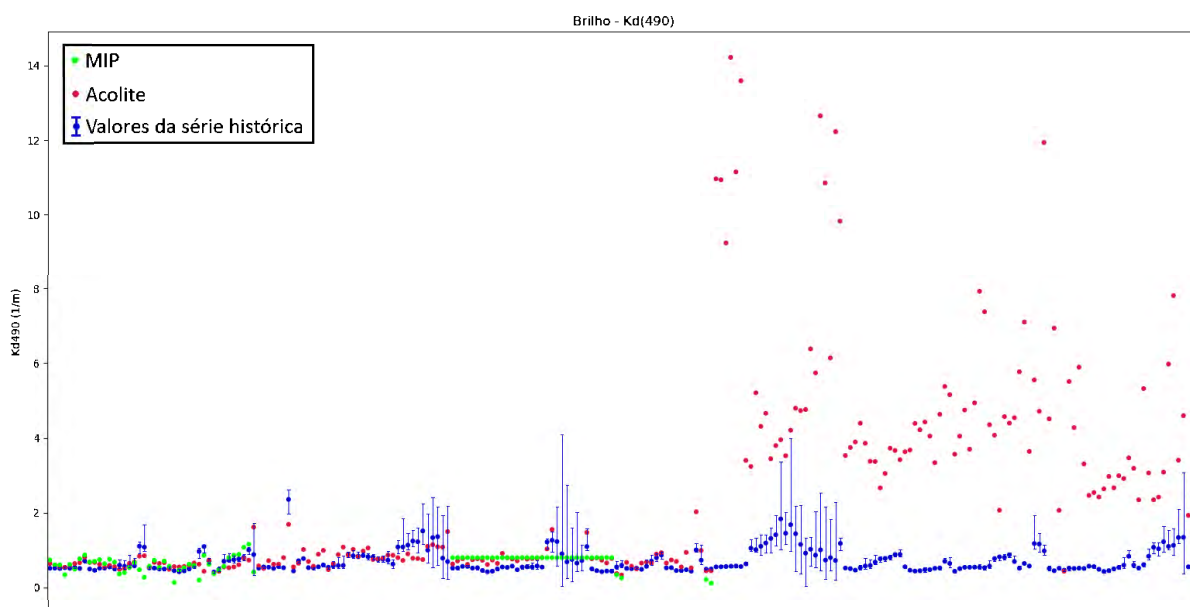


FONTE: O autor (2020).

Apesar da expectativa é que o vapor na atmosfera afetasse de forma significativa os dados ao se comparar com dados da série histórica em imagens sem

fenômenos, isso não foi o observado, tendo uma pequena diferença dos valores de RMSE e MAPD se comparados com os pontos em áreas com águas claras. Os pontos com uma concentração de vapor maior foram mascarados pelo MIP, o que explica a diferença de n entre os dois algoritmos, e também os valores menores de RMSE e MAPD.

GRÁFICO 39 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO KD(490)

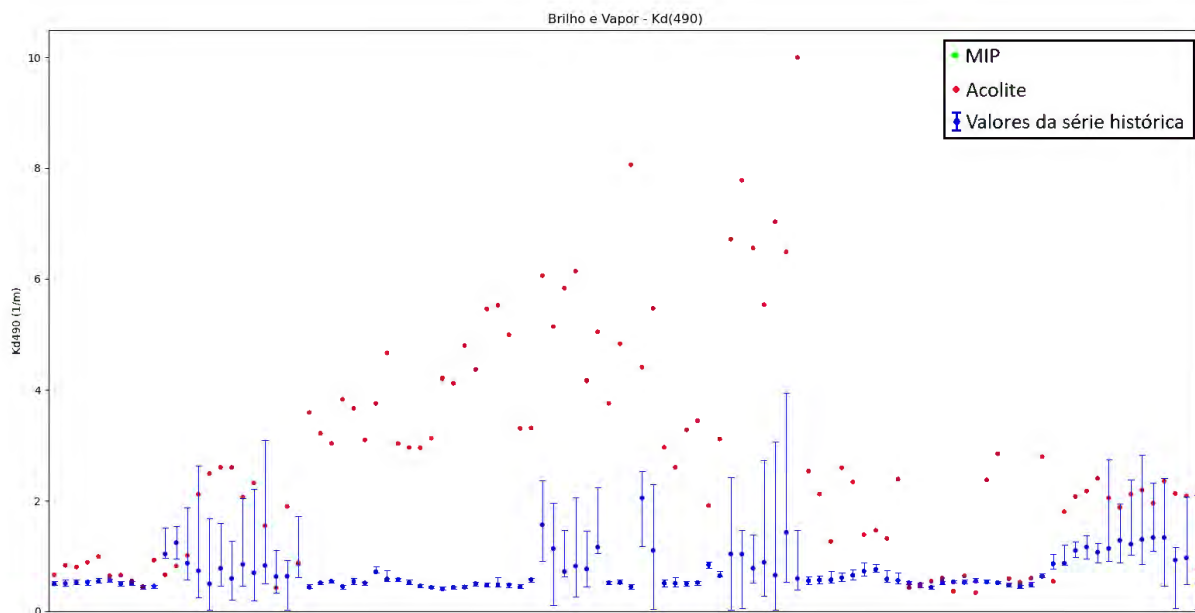


FONTE: O autor (2020).

Na questão do brilho (GRÁFICO 39), parte significativa dos pontos foram mascarados pelo MIP, nesse caso os pontos com maior intensidade, representados no gráfico pelos pontos mais à direita no eixo x. Feita a correção do brilho e aplicada as máscaras, o RMSE e o MAPD para os pontos do MIP são mínimos.

Para os pontos com menos intensidade, os valores ficam relativamente próximos às variações da série histórica. Se retirados os pontos de maior intensidade, os dados do Acolite ficam com um RMSE = 0.271 m<sup>-1</sup> e MAPD = 30.7%.

GRÁFICO 40 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO KD(490)

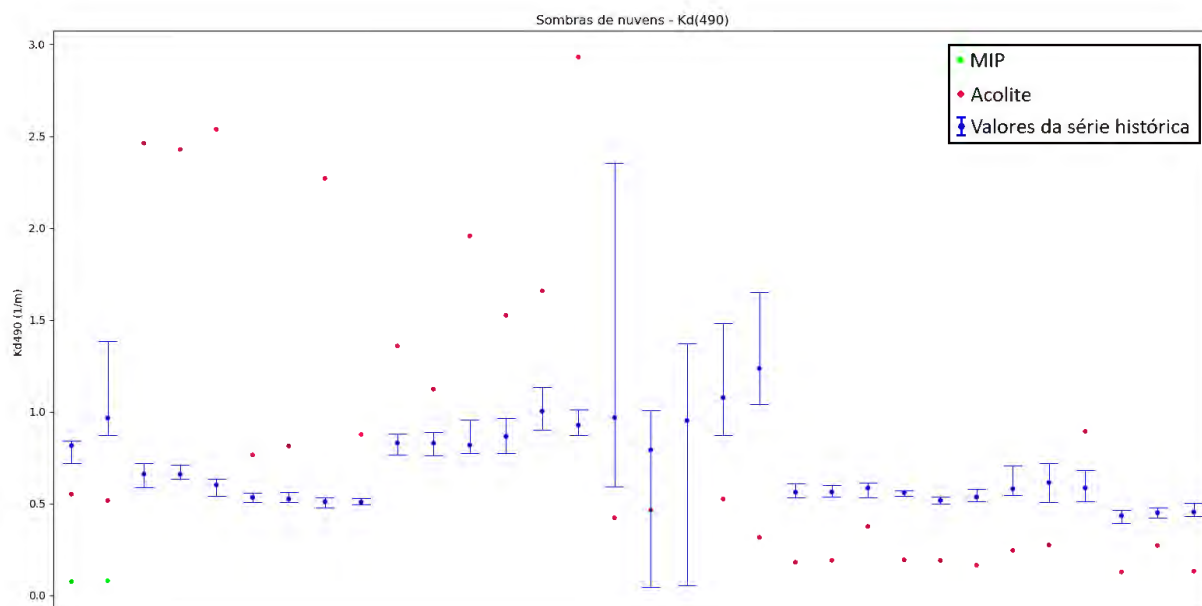


FONTE: O autor (2020).

Juntando os dois fenômenos anteriores (GRÁFICO 40), todos os pontos foram mascarados pelo MIP. O motivo fica evidente quando observado o gráfico, os dados na série histórica são significativamente menores que os dados com os fenômenos, tendo um RMSE de 2.88 1/m e MAPD de 342%, indicando alta dispersão.

Em termos de profundidade da penetração da luz, por exemplo, um  $K_d(490)$  de  $0.5 \text{ m}^{-1}$  (valor próximo da média da série história) é igual a um Z90 de 2m – comparado com um  $K_d(490)$  de  $3 \text{ m}^{-1}$  (aprox. média das amostras), é igual a um Z90 de 0.3m – uma diferença de 1.7m de profundidade. Mas isso não significa que a luz não está penetrando a lâmina d'água, apenas significa que o efeito do brilho solar e o vapor na atmosfera estão atenuando a radiação eletromagnética captada.

GRÁFICO 41 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO  $K_d(490)$



FONTE: O autor (2020).

No caso das sombras de nuvens (GRÁFICO 41), a maioria dos pontos foram mascarados pelo MIP, e os pontos do Acolite ficaram fora da dispersão da série histórica, porém sendo o fenômeno com menor RMSE e MAPD.

#### 4.2.2.2 Parâmetro Sólidos Suspensos Totais

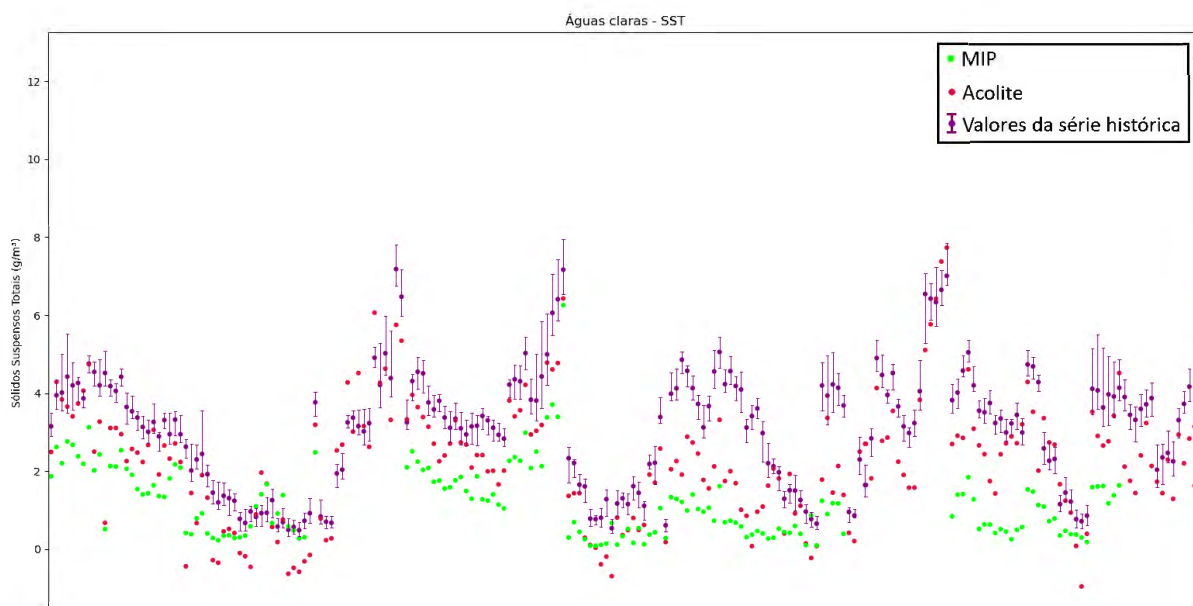
A TABELA 3 mostra os resultados de RMSE e MAPD para cada um dos fenômenos, incluindo o número de amostras (n).

TABELA 3 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO SST

Fenômeno	Acolite			MIP		
	RMSE	MAPD	n	RMSE	MAPD	n
Águas Claras	1.276	43.145	214	2.042	62.756	163
Vapor	5.969	136.228	138	2.516	83.648	82
Brilho	1455.786	25972.629	232	1.380	23.876	79
Vapor e Brilho	1003.236	17281.357	104	-	-	-
Sombras de nuvens	24.235	335.742	31	-	-	-

Em questão dos valores de RMSE e MAPD, os algoritmos tiveram comportamento similar do que no cálculo do parâmetro  $K_d(490)$ , o que é esperado por serem parâmetros correlacionados (IOCCG, 2006).

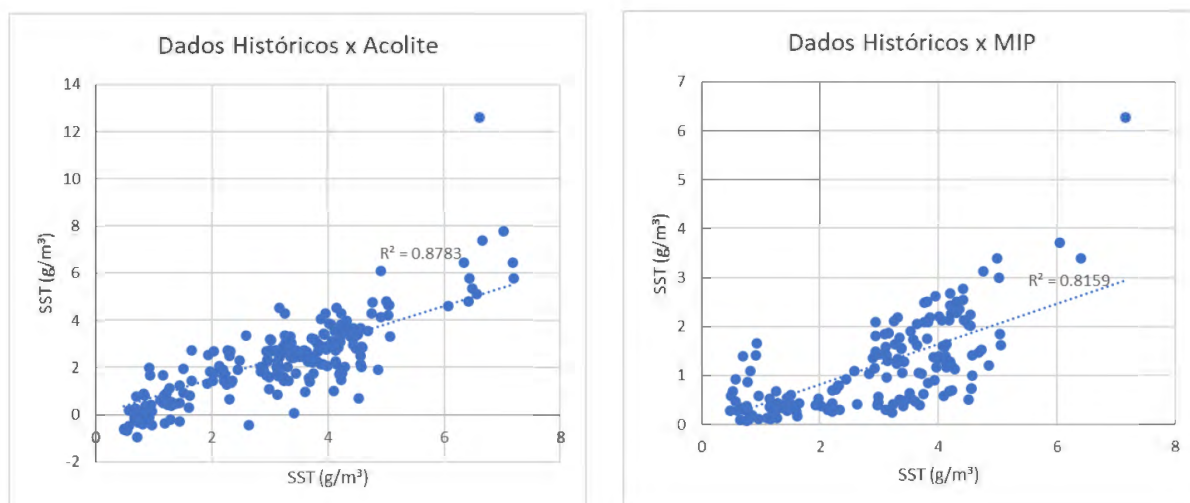
GRÁFICO 42 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO SST



FONTE: O autor (2020).

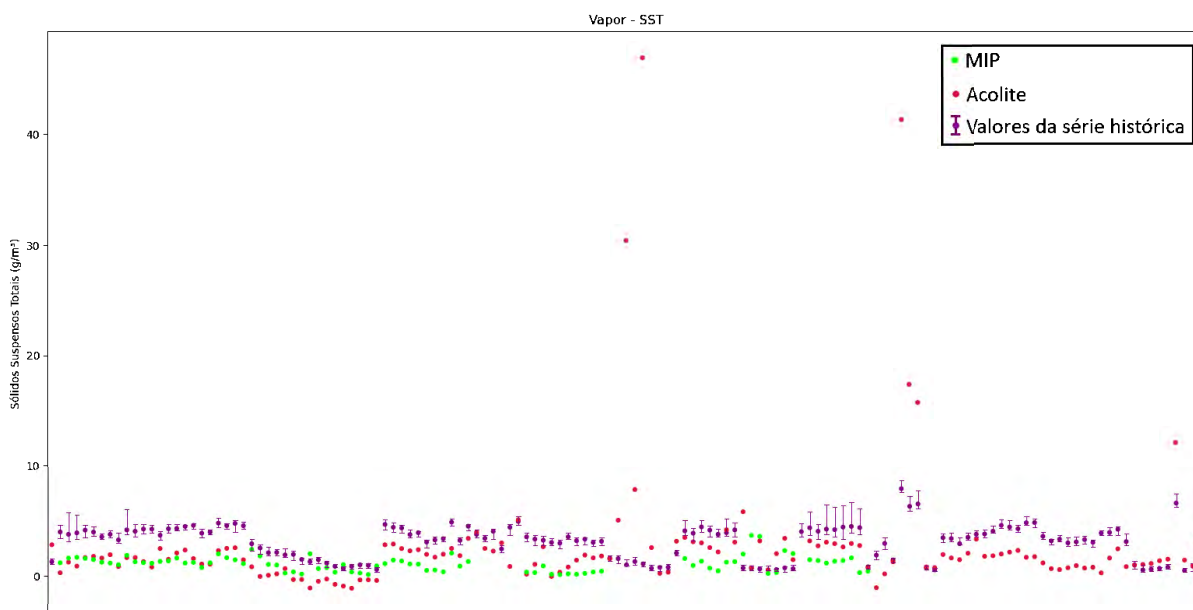
Como observado anteriormente, os valores seguem um padrão similar aos dados da série histórica, com um RMSE máximo de 2 g/m<sup>3</sup>. Ao contrário do que aconteceu com o K<sub>d</sub>(490), a dispersão em relação aos dados históricos é menor (GRÁFICO 42), evidenciando o padrão mencionado, conforme o GRÁFICO 43.

GRÁFICO 43 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO ACOLITE E MIP (SST)



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 44 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O VAPOR – PARÂMETRO SST

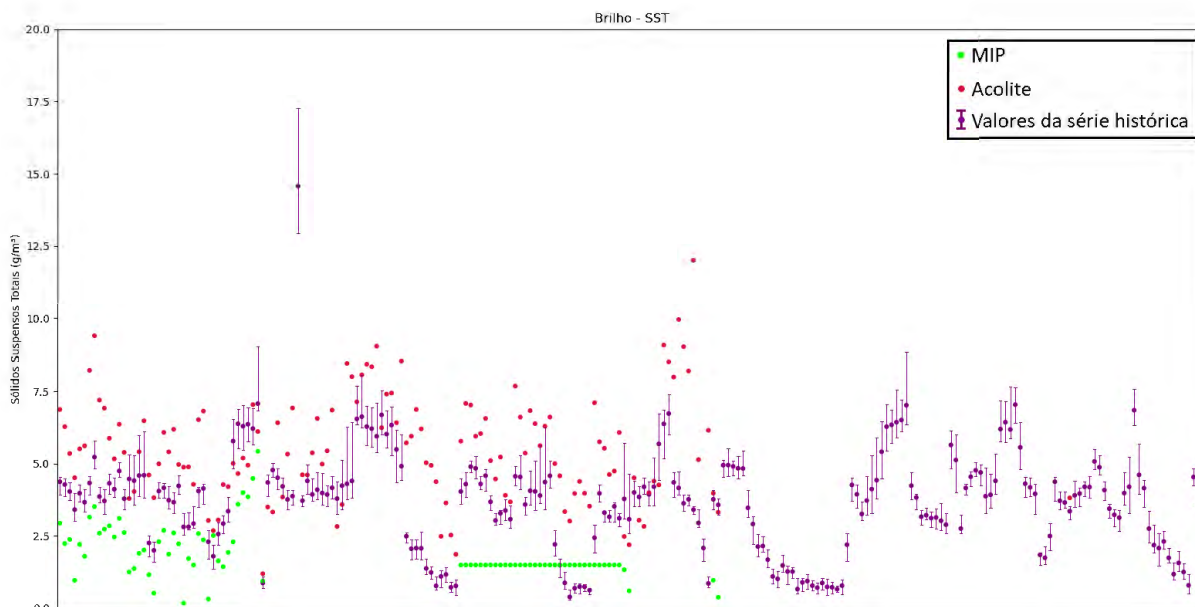


FONTE: O autor (2020).

Salvo alguns casos, conforme o GRÁFICO 44, o vapor na atmosfera não afetou de forma significativa os dados – se comparado com os outros fenômenos. Os valores do Acolite mostraram um RMSE de  $5 \text{ g/m}^3$ , enquanto para o MIP este valor foi menor devido a aplicação das máscaras, retirando 56 pontos da análise.

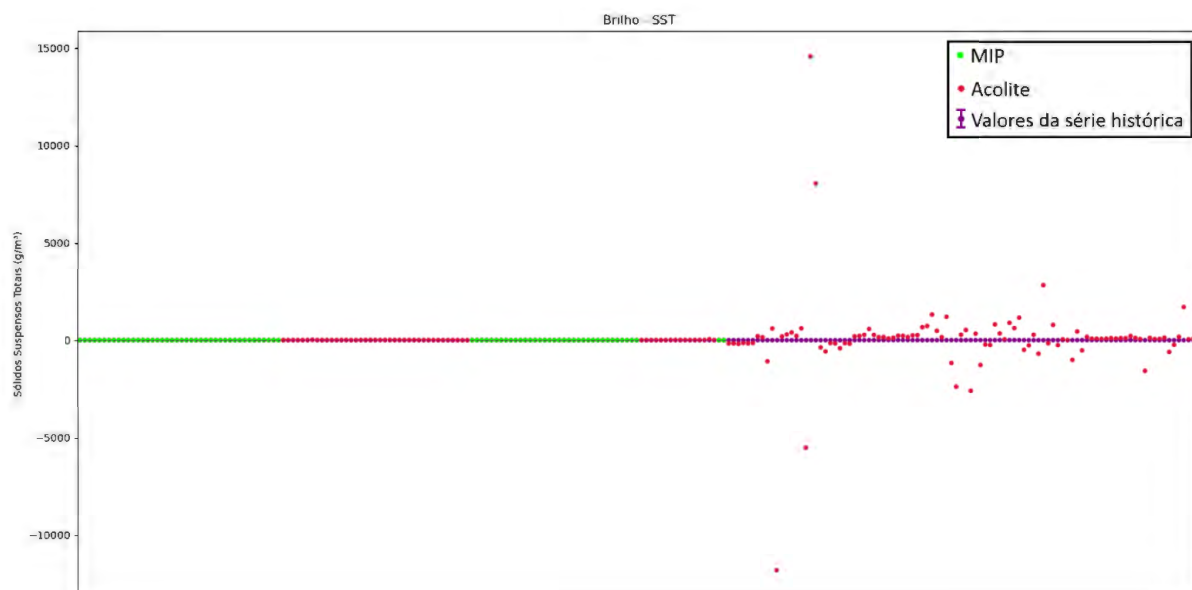
GRÁFICO 45 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO SST





FONTE: O autor (2020).

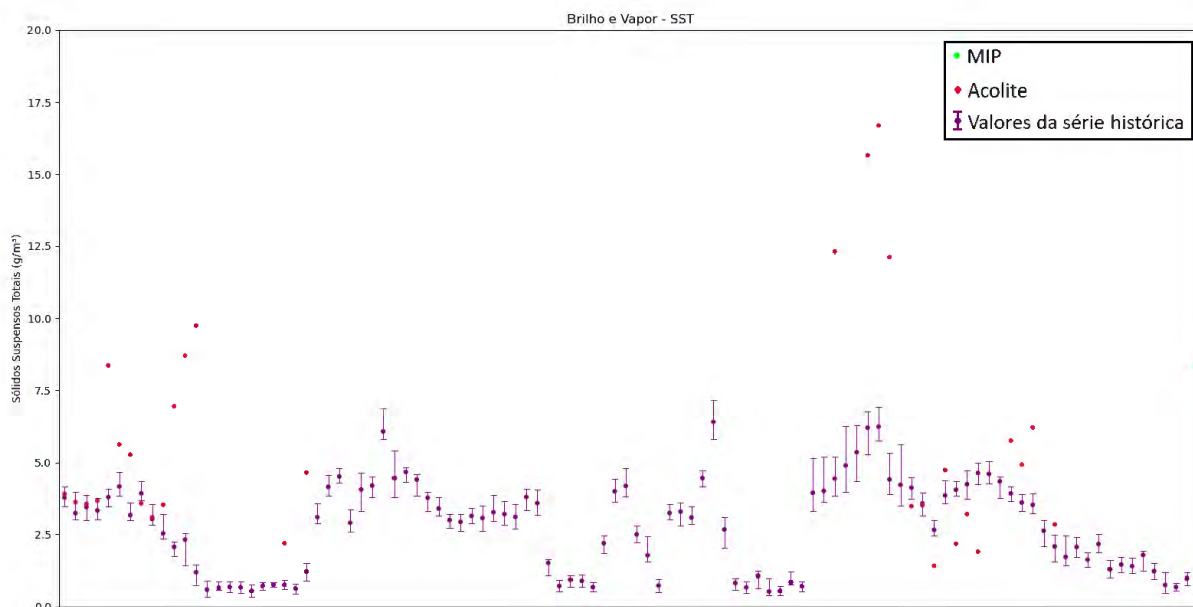
GRÁFICO 46 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST – SEM ZOOM



FONTE: O autor (2020).

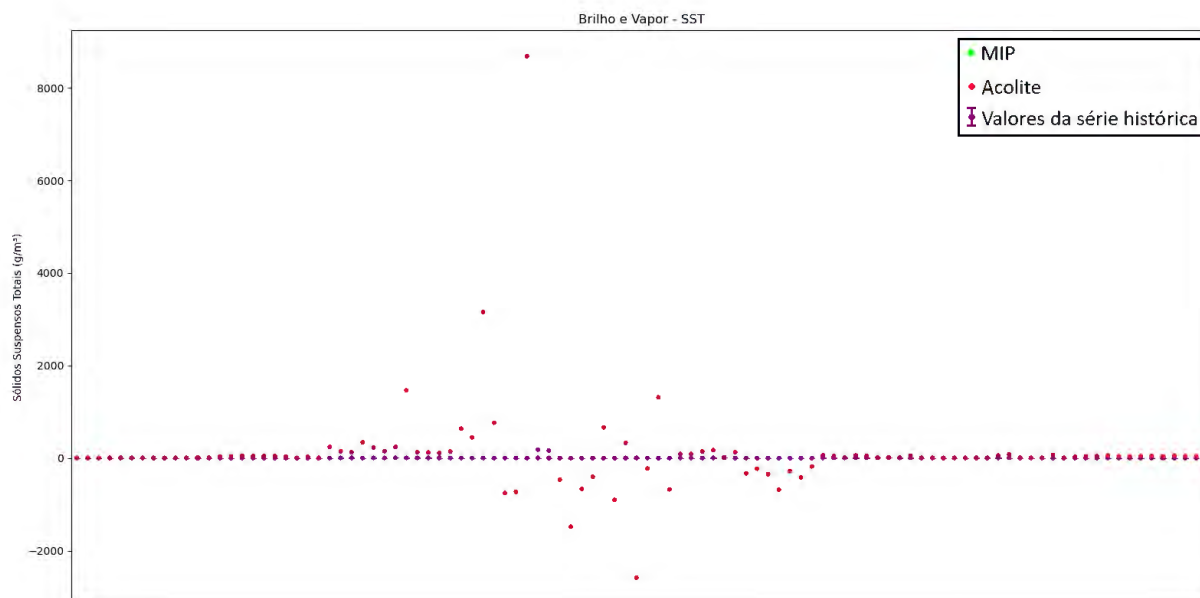
Conforme os gráficos (GRÁFICO 45 e GRÁFICO 46), o fenômeno brilho apresentou maiores efeitos nos dados. Inclusive, é possível se observar que, mesmo com os pixels mascarados, existe uma série de pontos com os mesmos valores em sequência processados pelo MIP, o que significa alguma anomalia causada no processamento.

GRÁFICO 47 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST



FONTE: O autor (2020).

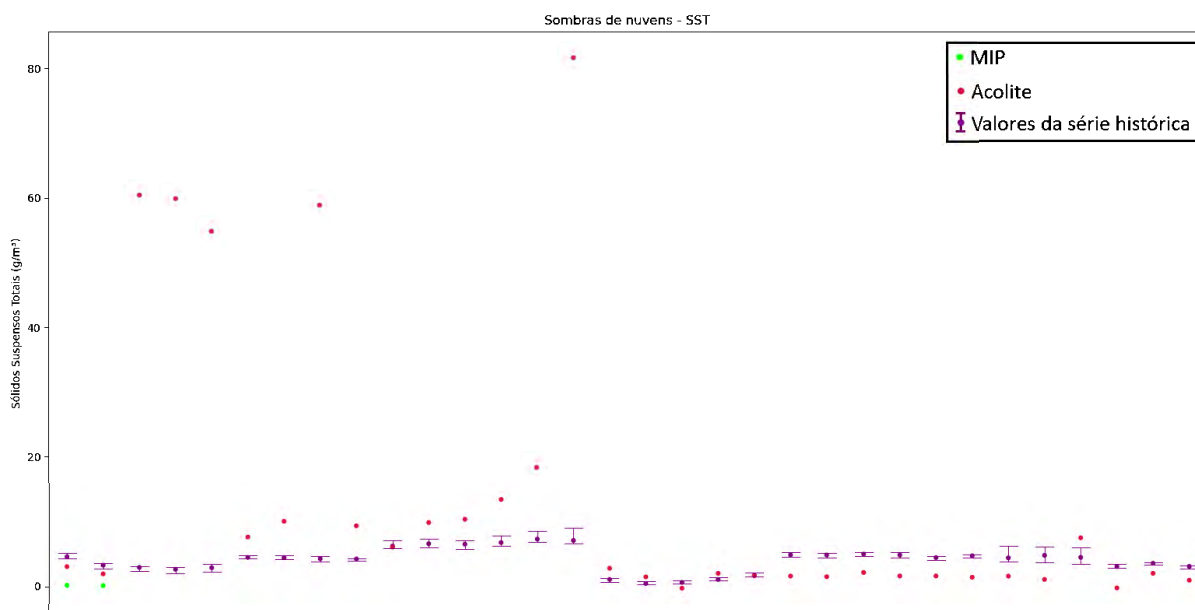
GRÁFICO 48 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO SST – SEM ZOOM



FONTE: O autor (2020).

Como ocorrido anteriormente, todos os pontos foram mascarados pelo sistema MIP, o motivo sendo evidente quando observado os dados processados pelo Acolite – mostrado no GRÁFICO 47 e no GRÁFICO 48. A influência do brilho aparenta ser o fator que altera os valores se comparado com o vapor, baseado nos valores de RMSE e MAPD apresentados na TABELA 3.

GRÁFICO 49 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO SST



FONTE: O autor (2020).

Como observado no GRÁFICO 49, nem todos os casos os valores de SST são menores que os valores da série histórica. O esperado é que os valores sejam menores, pois tanto SST quanto Turbidez são parâmetros conduzidos pela retrodifusão (IOCCG, 2006), o que aumentaria os valores de reflectância – ao contrário do que acontece nas sombras, onde a reflectância deveria ser menor. Além disso, os valores de RMSE são mais elevados do que encontrado na série histórica. Mesmo em dados coletados em campo, os valores de SST não chegaram às concentrações mais elevadas calculadas (Lactec, 2019).

Conforme mencionado, a presença de vapor acima das sombras pode ter afetado os resultados. O único fator que pode ser utilizado como detector consistente de vapor seria os dados de reflectância da Banda 10, porém como observado, o vapor pode também aumentar a reflectância em outras bandas. Uma

análise mais profunda seria necessária para quantificar esse incremento, o que também seria diferente dependendo da metodologia utilizada.

#### 4.2.2.3 Parâmetro Turbidez

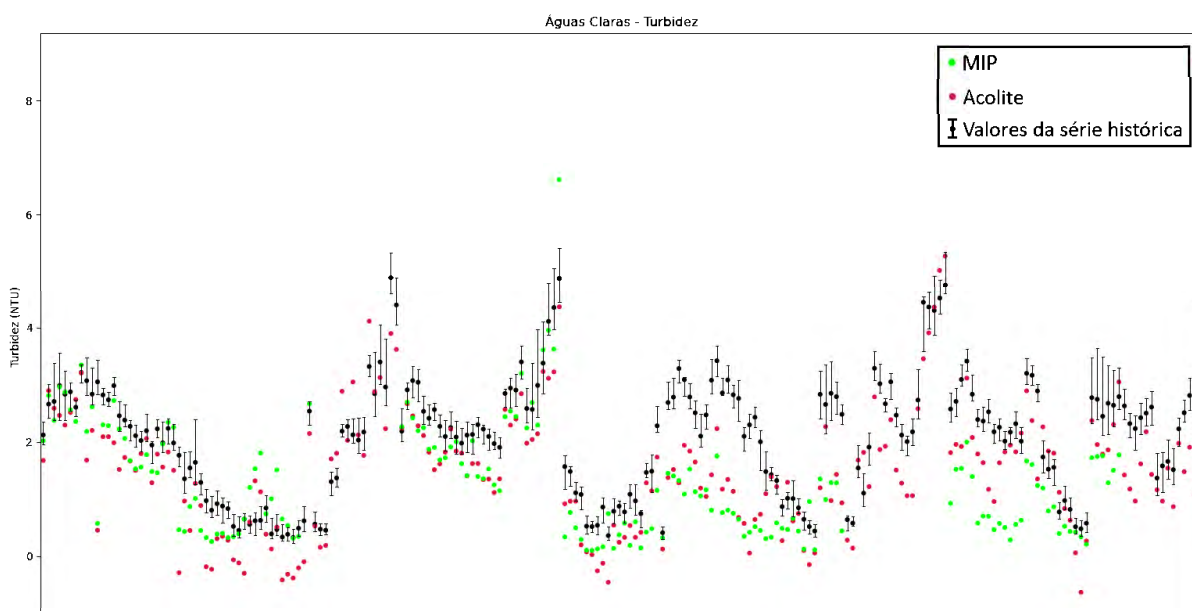
A TABELA 4 mostra os resultados de RMSE e MAPD para cada um dos fenômenos, incluindo o número de amostras (n).

TABELA 4 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO TURBIDEZ

Fenômeno	Acolite			MIP		
	RMSE	MAPD	n	RMSE	MAPD	n
Águas Claras	0.867	43.303	214	1.018	47.363	163
Vapor	103.7098	1071.918	138	1.45826	86.43995	82
Brilho	43139.5	608092.5	232	0.987653	49.47504	79
Vapor e Brilho	13161.37	447094.8	103	-	-	-
Sombras de nuvens	233.6154	4147.491	31	-	-	-

De todos os parâmetros testados, a turbidez foi o que teve os resultados mais extremos. Conforme os relatórios dos dados de qualidade da água de campo, os valores de turbidez raramente passam de 10 NTU (Lactec, 2019), o mesmo foi constatado em outras campanhas de campo realizadas por outros pesquisadores na área de estudo (CESP, 2002; Carvalho, Velini, Cavenaghi & Negrisoli, 2005).

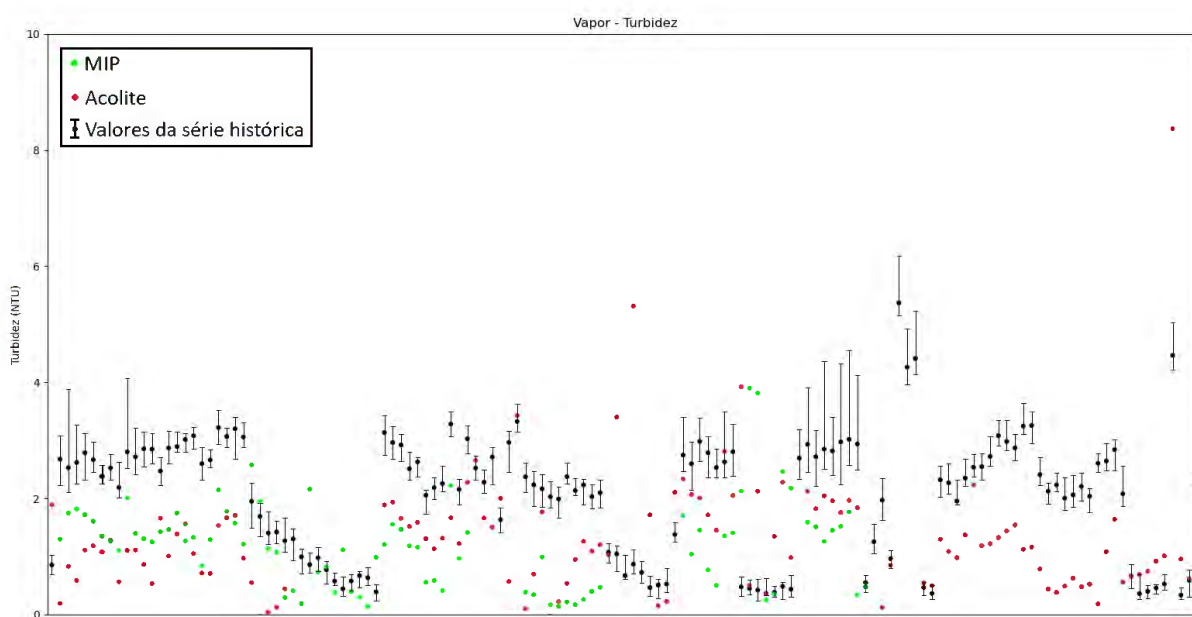
GRÁFICO 50 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO TURBIDEZ



FONTE: O autor (2020).

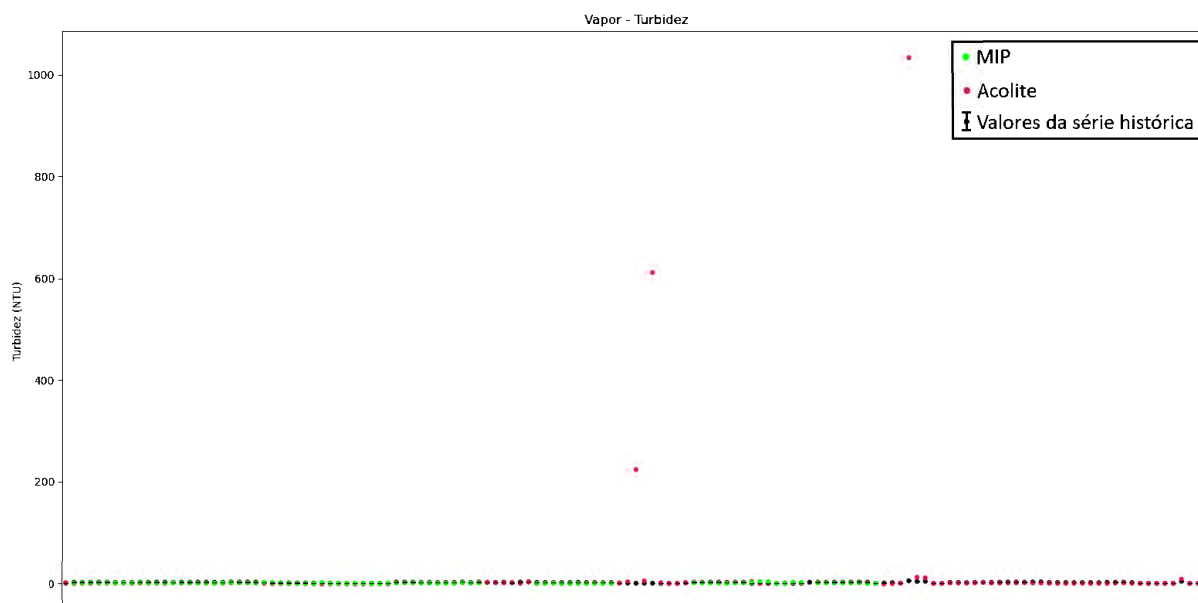
Em áreas sem fenômenos (GRÁFICO 50), os resultados são comparáveis aos do parâmetro SST, com dispersão, valores de RMSE e MAPD similares.

GRÁFICO 51 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO TURBIDEZ



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 52 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM



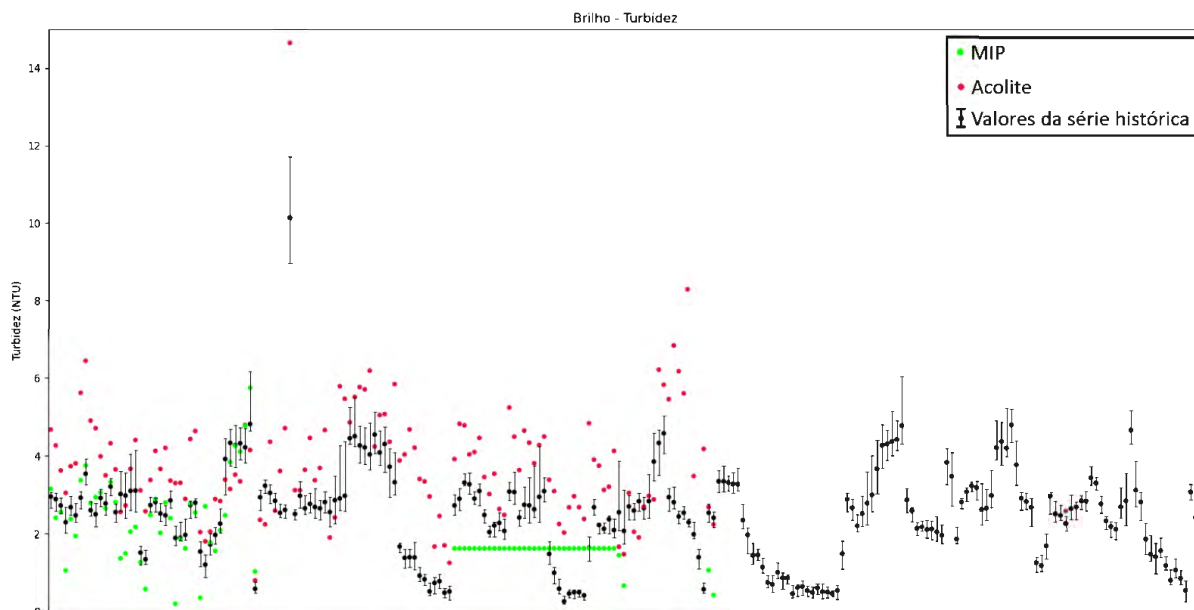
FONTE: O autor (2020).

Em questão de valores de vapor (GRÁFICO 51 e GRÁFICO 52), apenas três pontos do Acolite tiveram valores extremos. Estes dados não foram considerados como outliers pois o objetivo é verificar as anomalias.

Dos dados mais próximos da série histórica, desconsiderando os valores altos, o valor do RMSE seria de 1.7 NTU e MAPD de 75%, mais elevados dos dados em águas claras. Mesmo com os pontos mascarados, os valores de RMSE e MAPD dos pontos processados pelo MIP são similares a estes valores do Acolite sem os dados extremos. Se comparados com a dispersão da série histórica, estes valores de RMSE não são significativos.

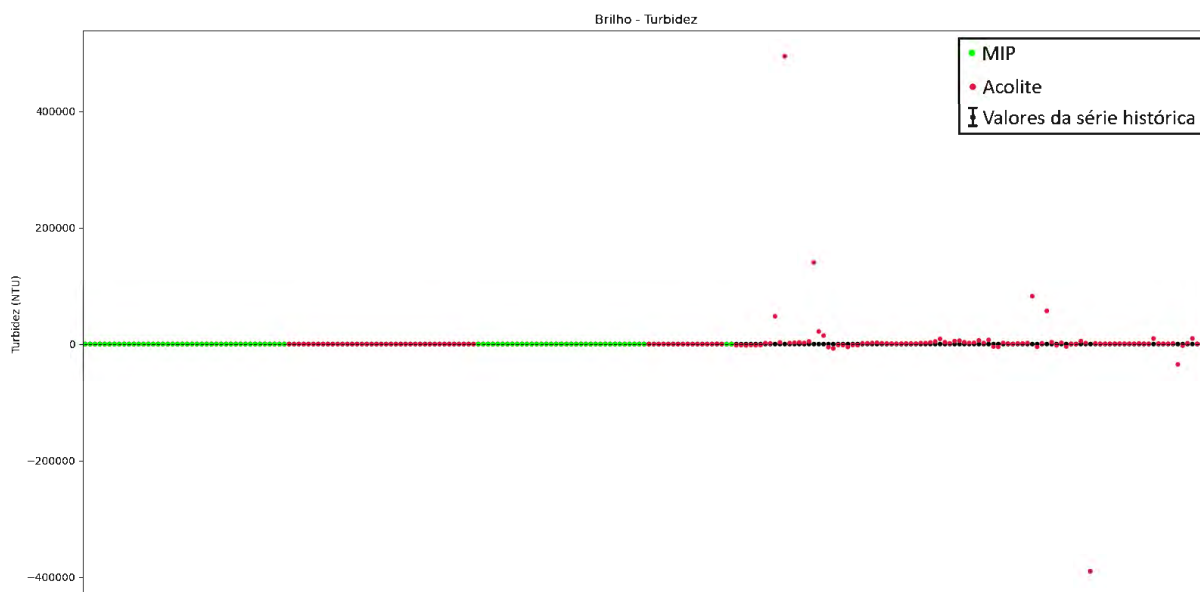
Juntando os resultados dos três parâmetros analisados até então, os dados indicam que as áreas com vapor não alteram os valores de forma significativa, reforçado pelos resultados obtidos no primeiro teste. Dos pontos que parecem alterar e não possivelmente não forem mascarados pelos algoritmos, uma análise mais detalhada das imagens e uma comparação com a série histórica de dados, tanto de campo, quanto obtidas via imagens de satélite, seria o ideal para decidir se essas áreas devem ser mascaradas.

GRÁFICO 53 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 54 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM

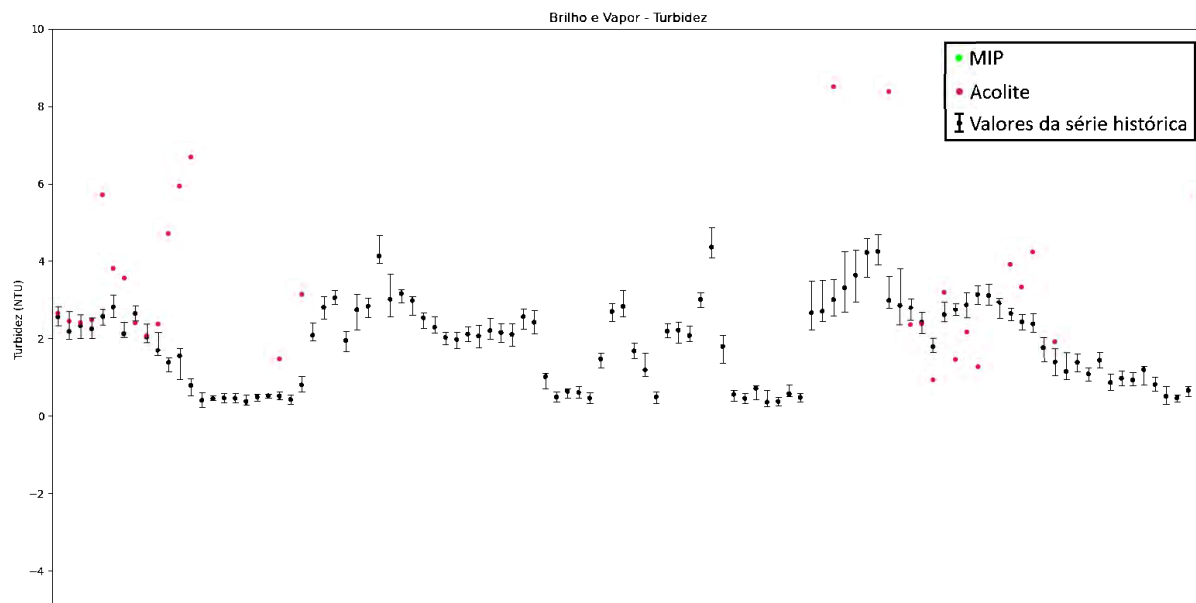


FONTE: O autor (2020).

Com menos valores extremos (GRÁFICO 53 e GRÁFICO 54), os pontos com brilho de maior intensidade novamente alteraram os dados com mais frequência, representados pelos pontos mais à direita nos gráficos (GRÁFICO 53 e GRÁFICO 54) – também mascarados pelo MIP. A eficácia da correção do brilho se

mostra neste caso, observado nos valores baixos de RMSE apresentados pelo algoritmo MIP. Se retirados os pontos extremos, os valores de RMSE para os pontos do Acolite é igual a 1.7 NTU, 0.8 NTU mais elevado que o valor dos pontos processados pelo MIP.

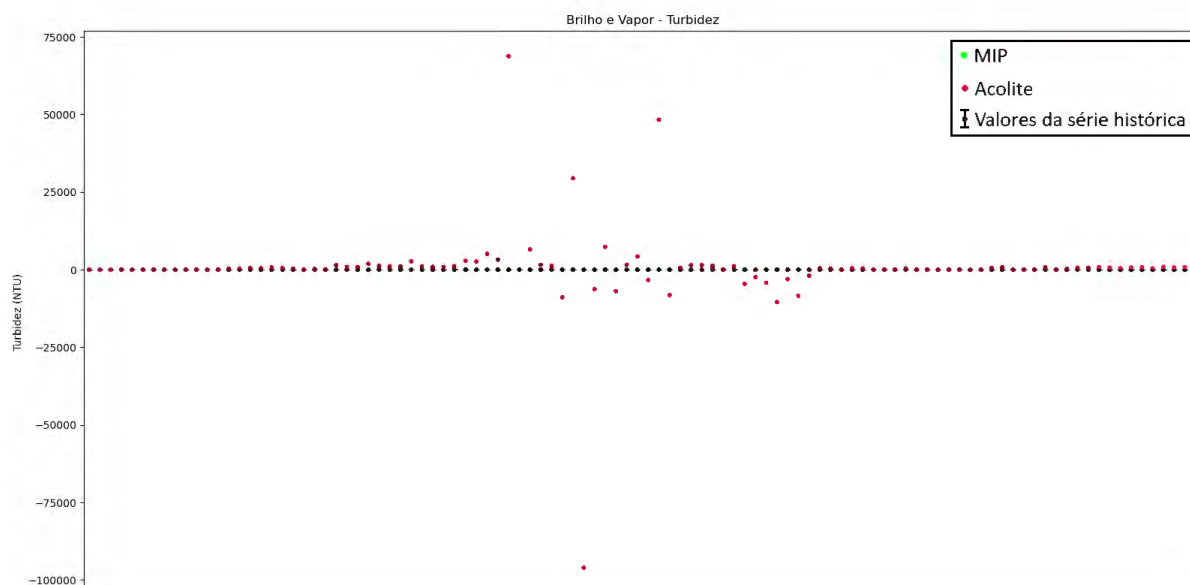
GRÁFICO 55 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 56 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM

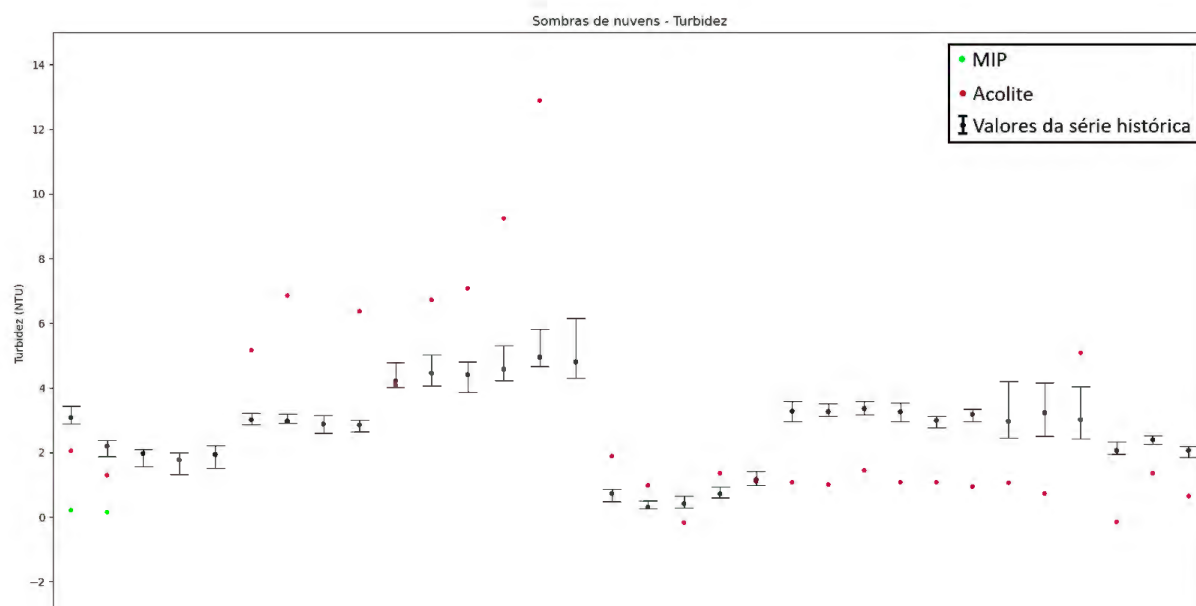




FONTE: O autor (2020).

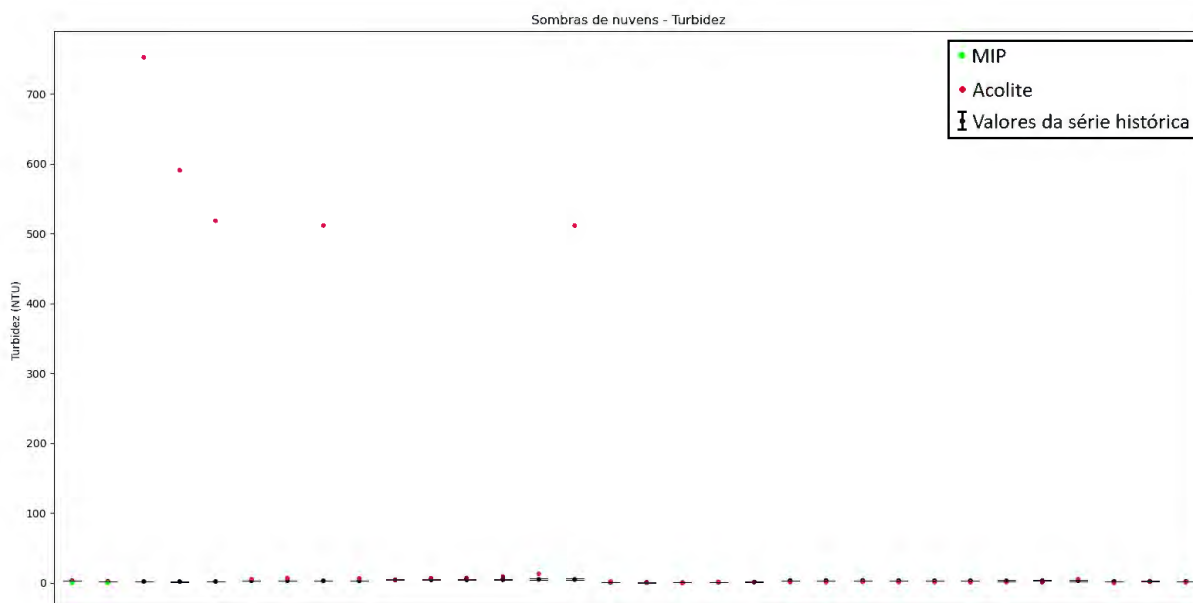
Como esperado, quando juntados os dois fenômenos os dados reagem de forma extrema, mostrado nos gráficos (GRÁFICO 55 e GRÁFICO 56). Com isso, e a pequena quantidade de dados com valores próximos aos da série histórica, se faz necessário que esses dados sejam mascarados.

GRÁFICO 57 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO TURBIDEZ



FONTE: O autor (2020).

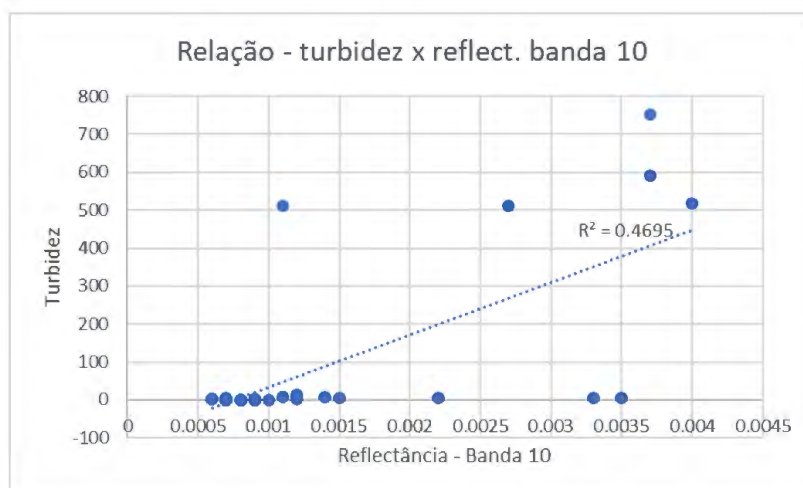
GRÁFICO 58 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO TURBIDEZ – SEM ZOOM



FONTE: O autor (2020).

Alguns valores extremos foram registrados na análise dos pontos com sombras de nuvens conforme o GRÁFICO 58, o que não ocorreu com os outros pontos. Como foi a terceira ocorrência de valores mais elevados, os valores de reflectância TOA dos pontos foram verificados para a possibilidade de vapor na atmosfera acima das sombras. Os pontos foram plotados em um gráfico de dispersão (GRÁFICO 59).

GRÁFICO 59 – DISPERSÃO ENTRE TURBIDEZ E OS VALORES DE REFLECTÂNCIA DA BANDA 10 PARA OS PONTOS COM SOMBRAS DE NUVENS



FONTE: O autor (2020).

Com esses resultados, descarta-se a possibilidade que a reflectância na banda 10 tenham relação com os valores elevados de turbidez. Conforme o gráfico (GRÁFICO 13), os valores máximos de reflectância na banda 10 destes pontos estão na média dos valores de reflectância constatados na base de dados.

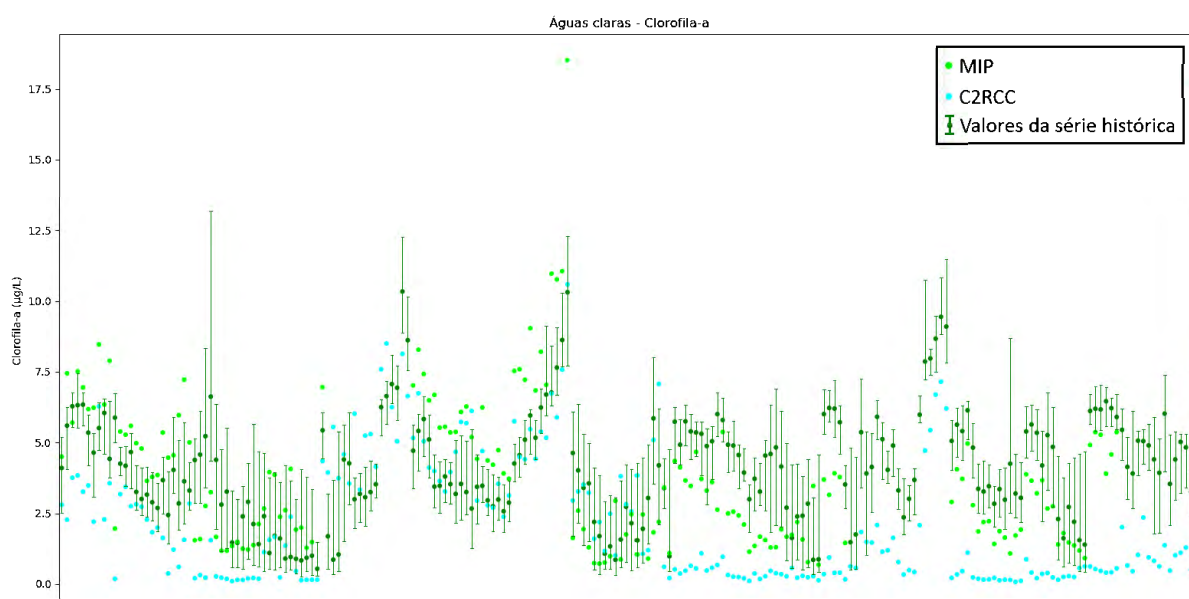
#### 4.2.2.4 Parâmetro Clorofila-a

A TABELA 5 mostra os resultados de RMSE e MAPD para cada um dos fenômenos, incluindo o número de amostras (n).

TABELA 5 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS PARA O PARÂMETRO CLOROFILA-A

Fenômeno	C2RCC			MIP		
	RMSE	MAPD	n	RMSE	MAPD	n
Águas Claras	3.040	65.973	214	2.027	50.472	163
Vapor	3.905	494.364	139	2.90493	97.59964	82
Brilho	13.689	250.631	232	2.361568	31.04427	79
Vapor e Brilho	13.331	353.103	104	-	-	-
Sombras de nuvens	6.294	98.135	31	-	-	-

GRÁFICO 60 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA ÁGUAS CLARAS – PARÂMETRO CLOROFILA-A

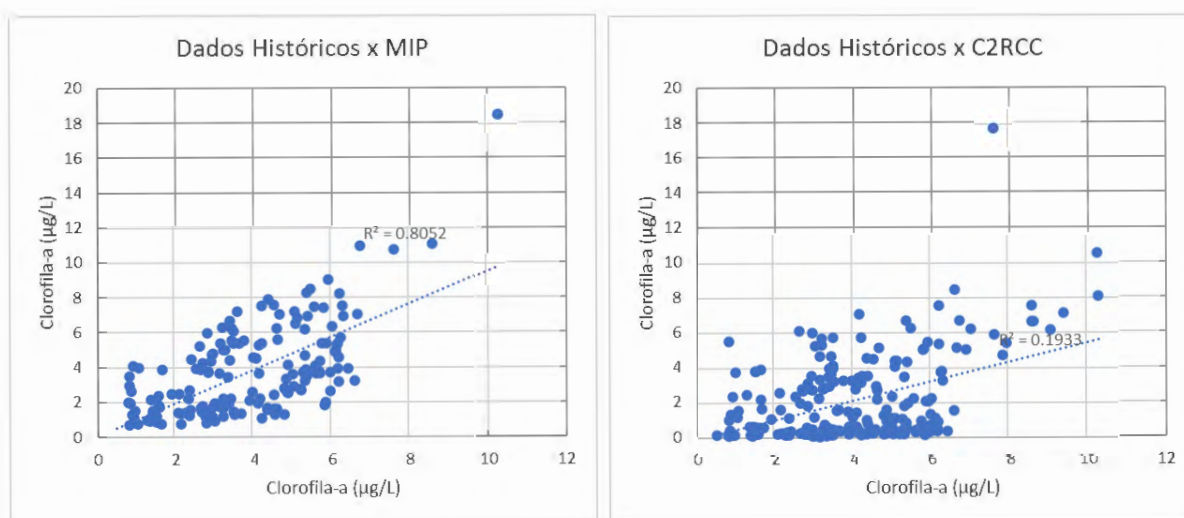


FONTE: O autor (2020).

A clorofila-a se apresentou como um parâmetro com um maior número de incertezas, visto a variação dos tamanhos das barras de erros no GRÁFICO 60, tornando o uso da mediana como parâmetro comparativo algo com menor acurácia. Além disso, outros estudos indicam que a concentração de clorofila é inferior a 10 µg/L nos locais medidos do reservatório (LACTEC, 2019; Mata, 2011; CESP, 2002).

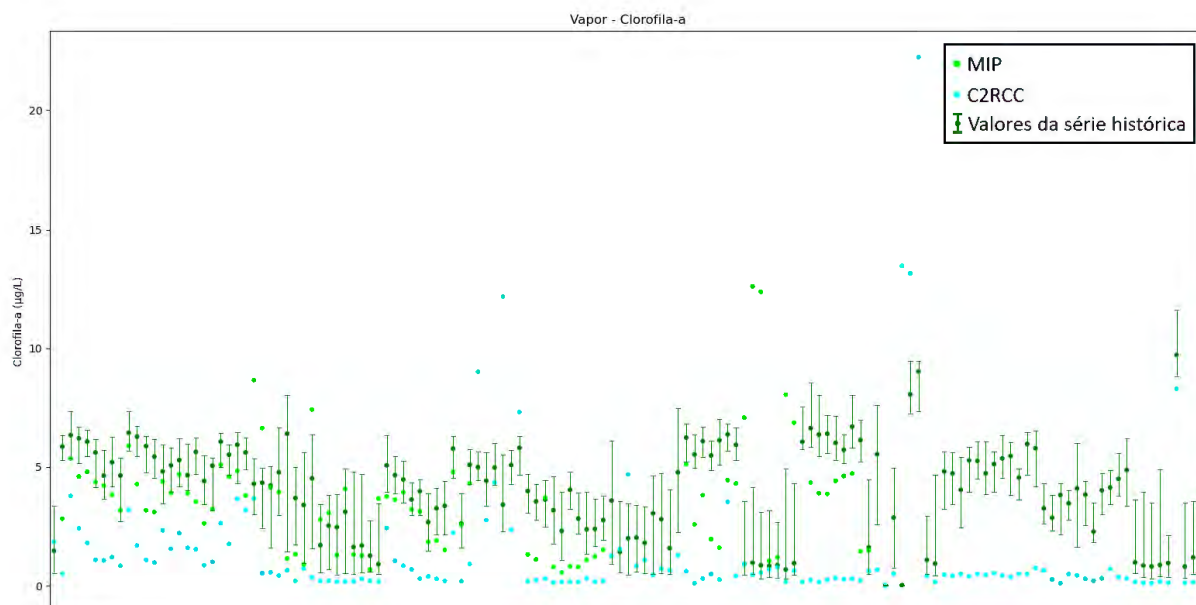
Além disso, os padrões coincidentes das variações dos pontos são observados de forma mais consistente nos pontos processados no sistema MIP, apesar desses dados estarem sendo comparados com a série histórica das imagens processadas pelo próprio C2RCC. Este padrão pode ser observado no GRÁFICO 6.

GRÁFICO 61 – DIFERENÇA DA DISPERSÃO ENTRE OS DADOS HISTÓRICOS E OS DADOS RETIRADOS DO C2RCC E MIP (CLOROFILA-A)



FONTE: O autor (2020).

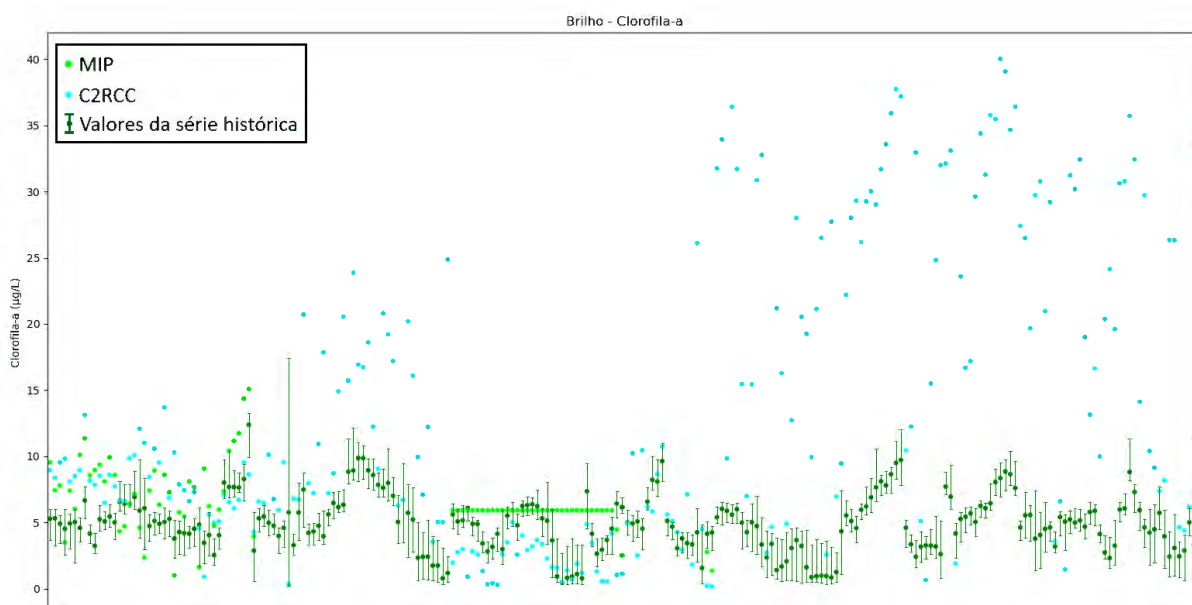
GRÁFICO 62 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR – PARÂMETRO CLOROFILA-A



FONTE: O autor (2020).

O GRÁFICO 62 indica um comportamento particular do C2RCC de diminuir as concentrações nas áreas com os fenômenos. Foi observado no gráfico (gráfico reflectância do vapor) que o C2RCC permanece como o algoritmo com os menores níveis de reflectância na maioria das bandas.

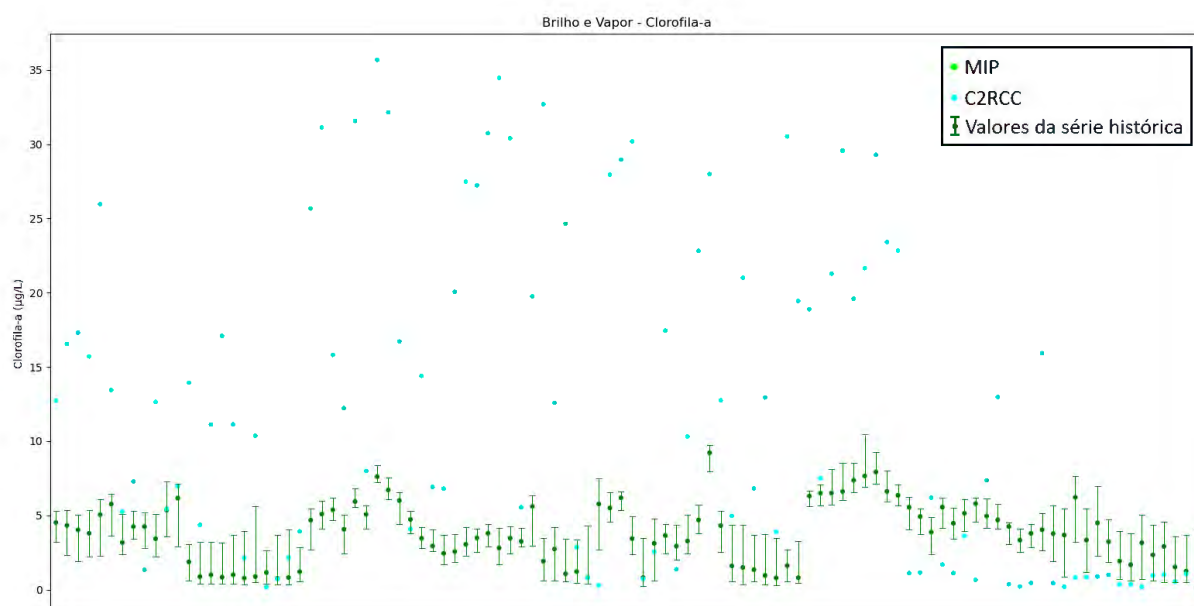
GRÁFICO 63 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA O BRILHO – PARÂMETRO CLOROFILA-A



FONTE: O autor (2020).

Como o algoritmo C2RCC não tem correção de brilho, a expectativa é que os valores sejam mais elevados, o que foi o caso na maioria dos pontos – observado no GRÁFICO 63. O MIP manteve o padrão e mascarou os pontos com intensidade mais elevadas. Conforme estabelecido quais os pontos que tiveram os valores mais elevados, sendo que eles são correspondentes para os quatro parâmetros, é possível identificar possíveis limiares de dados de reflectância a partir disso.

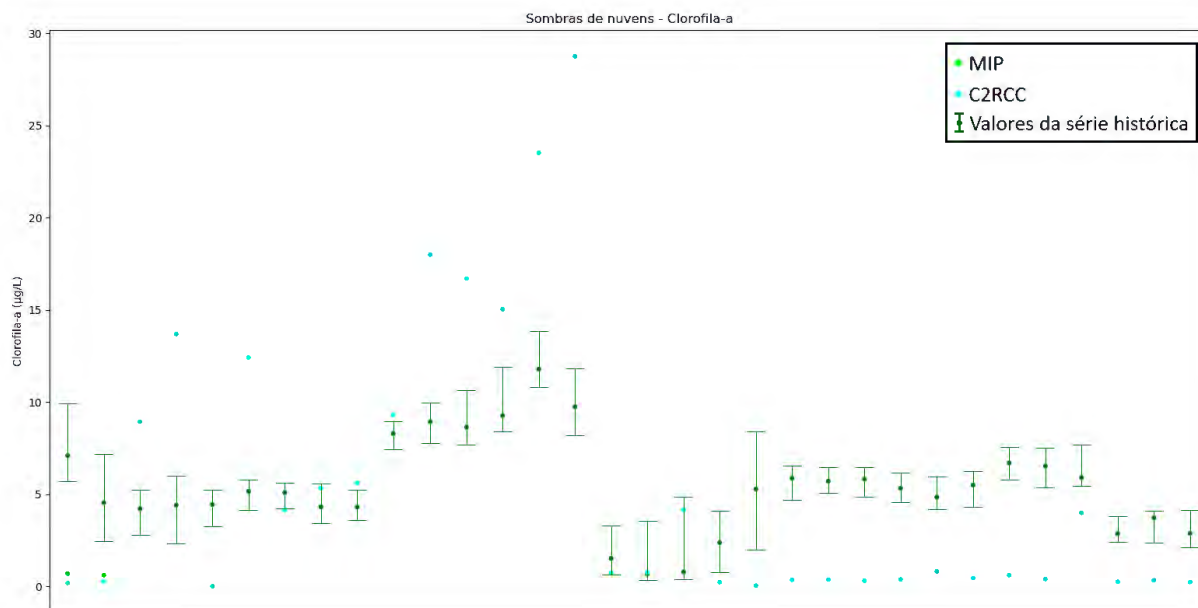
GRÁFICO 64 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA VAPOR E BRILHO – PARÂMETRO CLOROFILA-A



FONTE: O autor (2020).

No caso da junção dos dois fenômenos, os resultados se repetem, mostrado no GRÁFICO 64. O algoritmo MIP mascarou todos os pontos, enquanto o C2RCC apresentou uma distribuição de certa forma caótica, evidenciado pelos altos valores de MAPD (353%). O fato de que as concentrações não cheguem a valores virtualmente impossíveis, como ocorrido diversas vezes nos processamentos do Acolite, identifica-se que o método baseado em redes neurais do C2RCC consegue limitar os dados por meio de algum mecanismo interno ao algoritmo.

GRÁFICO 65 – VARIAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA X DADOS DOS ALGORITMOS BIO-ÓTICOS PARA AS SOMBRAS DE NUVENS – PARÂMETRO CLOROFILA-A



FONTE: O autor (2020).

Novamente, conforme o GRÁFICO 65, a maioria dos pontos com sombras foram mascarados pelo MIP, e os outros apresentaram padrão similar com o do Acolite – os primeiros pontos com valores maiores que o da série histórica, além dos pontos mais adiante com valores menores.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram retirados valores de reflectância de diversos fenômenos naturais através da utilização de imagens orbitais do sensor MSI, no intuito de criar uma base de dados de reflectância como referência para cada um dos fenômenos. Foi também analisado o comportamento de algoritmos de correção atmosférica em relação aos fenômenos e também aos valores de reflectância da base de dados, além de quanto esses fenômenos podem afetar algoritmos que calculam valores de propriedades óticas da água (algoritmos bio-óticos).

Os métodos utilizados se mostraram suficientes para o atingimento dos objetivos. A hipótese levantada é que os métodos de correção atmosférica, seja de métodos generalizados ou de métodos específicos para corpos d'água, podem levar a erros na identificação de efeitos inerentes a atmosfera e aos corpos d'água. Vários fenômenos foram contabilizados ao longo da criação da base de dados e comparados com valores representando águas claras sem a presença de

fenômenos, mas foi identificado que os mais relevantes seriam o brilho do Sol, vapor na atmosfera e sombras de nuvens. Entre esses, verificou-se que o brilho do Sol é o que mais causa efeitos e, em conjunto com a presença de vapor na atmosfera, os dados são inutilizados. Além disso, devido a curvas espectrais similares às de águas claras, as sombras das nuvens também se mostraram problemáticas para os algoritmos, podendo tanto aumentar quanto diminuir os valores. Foi cogitado a hipótese que talvez existisse a presença de vapor acima das sombras das nuvens, portanto aumentado os dados, mas essa hipótese não se confirmou devido à baixa correlação desses dados com os valores de reflectância da banda 10. Apesar de sua expressividade, a presença de vapor na atmosfera se mostrou pouco nocivo nas intensidades analisadas, o que não foi antecipado.

Os algoritmos de correção atmosférica mitigam grande parte dos erros ao utilizar as máscaras para retirar os pixels afetados das análises, porém diversos dados. Mesmo com a correção de brilho, grande parte dos dados foram inutilizados e subsequentemente mascarados. Dos pontos que não foram mascarados, os valores apresentaram grande alteração.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Reitera-se que esse trabalho foi um teste em pequena escala utilizando apenas uma área de estudo para verificar a viabilidade da criação de uma base de dados totalmente empírica, os valores da base de dados criados no caso serviriam como referência apenas para essa área de estudo. Porém, levando em consideração o estado da arte da tecnologia de programação, a automatização dos processos de seleção de amostras se faz possível. Aliás, com a utilização de redes neurais, como por exemplo o método utilizado no algoritmo C2RCC (Doerffer & Schiller, 2008), é possível criar um método que calcula a probabilidade de cada pixel conter determinado fenômeno, estar inserido em determinada categoria e decidir se deve ser mascarado ou não – similar aos algoritmos de *spectral unmixing*. Como os valores de referência têm uma variação em vezes caótica, muitas vezes se sobrepondo entre diferentes fenômenos, as redes neurais podem ser uma solução viável tendo um número de amostras suficiente.

Na questão de recomendações baseadas nas experiências deste trabalho: quando há a presença desses fenômenos, uma análise cuidadosa deve ser feita das



imagens. Como visto, alguns fenômenos não são totalmente nocivos (dependendo da intensidade) e a correção atmosférica pode lidar com eles. A recomendação é não confiar totalmente nos algoritmos e tomar algum tempo, se possível, mascarar manualmente áreas principalmente com brilho e sombras de nuvens. Da mesma forma, também não confiar totalmente nas máscaras dos próprios algoritmos, pois como visto também podem apresentar erros.

## REFERÊNCIAS

- Aparicio, C., & Bitencourt, M. D. (2015). Resposta espectral de macrófitas aquáticas. *IN: POMPEO, M*, 177-189.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S., & Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *ESASP*, 740, 54.
- Burt, W. B. (1953). A note on the reflection of diffuse radiation by the sea surface. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 34(2), 199-200.
- Carvalho, F. T., Velini, E. D., Cavenaghi, A. L., Negrisoli, E., & Castro, R. M. (2005). Influência da turbidez da água do rio Tietê na ocorrência de plantas aquáticas. *Planta daninha*, 23(2), 359-362.
- Chen, H., Li, W., Huang, W., & Niu, Z. (2016). View angle effects on relationships between leaf area index in wheat and vegetation indices. *AGUFM*, 2016, B31E-0528.
- Cho, H. J., & Lu, D. (2010). A water-depth correction algorithm for submerged vegetation spectra. *Remote Sensing Letters*, 1(1), 29-35.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J., (2007). *USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey*, Digital Data Series 231.
- Coluzzi, R., Imbrenda, V., Lanfredi, M., & Simoniello, T. (2018). A first assessment of the Sentinel-2 Level 1-C cloud mask product to support informed surface analyses. *Remote sensing of environment*, 217, 426-443.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP). (2002). Estudo ambiental da Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias – Jupia. 1-128.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP). (2009). *UHE Eng. Souza Dias (Jupia) Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial – PACUERA*. 1v.
- Cox, C., & Munk, W. (1955). Some problems in optical oceanography. *J. Mar. Res*, 14(1), 63-78.
- Doerffer, R., & Schiller, H. (2008). MERIS regional coastal and lake case 2 water project atmospheric correction ATBD. *GKSS research center*, 21502.
- Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote sensing of environment*, 156, 157-168.

Doxani, G., Vermote, E., Roger, J. C., Gascon, F., Adriaensen, S., Frantz, D., ... & Louis, J. (2018). Atmospheric correction inter-comparison exercise. *Remote Sensing*, 10(2), 352.

Duntley, S. Q. (1942). The optical properties of diffusing materials. *JOSA*, 32(2), 61-70.

Duntley, S. Q. (1950). *The Visibility of Submerged Objects: Optical Effects of Water Waves*. Visibility Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

Fearn, P. R. C. S., Dekker, A. G., & Lynch, M. J. (2001, July). Modelling water-leaving radiance. In *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)* (Vol. 6, pp. 2701-2703). IEEE.

Heege, T., Kiselev, V., Wettle, M., & Hung, N. N. (2014). Operational multi-sensor monitoring of turbidity for the entire Mekong Delta. *International Journal of Remote Sensing*, 35(8), 2910-2926.

Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing: Volume 2.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2002). Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE. 1 mapa. Escala 1:5 000 000. Recuperado de em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos>

IOCCG - International Ocean-Colour Coordinating Group (2020). Synergy between ocean colour and biogeochemical/ecosystem models.

IOCCG (2006). *Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications*. Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada.

IOCCG (2010). *Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products*. Wang, M. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 10, IOCCG, Dartmouth, Canada.

ITC. (2017). ITC's database of satellites and sensors. 2017. Recuperado de: <https://www.itc.nl/Pub/sensordb/AllSensors.aspx>

Kiselev, V., Bulgarelli, B., & Heege, T. (2015). Sensor independent adjacency correction algorithm for coastal and inland water systems. *Remote Sensing of Environment*, 157, 85-95.

Kiselev, V., Heege, T., Miksa, S., & Pinnel, N. (2005). A physically based technology for processing of water basin remote sensing data. In *31st International Symposium on Remote Sensing Environment, Proceedings of ISRSE, St. Petersburg*.

LACTEC. (2019). *Relatório E2A2: Campanhas de campo para qualidade da água e macrófitas*. 2019. Curitiba: Lactec e CTG Brasil.

Lee, Z. P., Du, K. P., & Arnone, R. (2005). A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C2).

Lee, Z., Carder, K. L., & Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from watercolor: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied optics*, 41(27), 5755-5772.

Leite, H. R., Antonio de Oliveira, F., Drago, D., Muraro, A., Fernando Brum Teixeira, L., Scheer Hainosz, F., Max Prochnow, R., Tamie Quicu, S., & Nascimento, C. (2019). Natural effects on remote sensing of water quality parameters data: a case study on available algorithms at the Jupia Reservoir, Brazil. In C. R. Bostater, X. Neyt, & F. Viallefont-Robinet (Eds.), *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2532327>

Malinowski, R., Groom, G., Schwanghart, W., & Heckrath, G. (2015). Detection and delineation of localized flooding from WorldView-2 multispectral data. *Remote sensing*, 7(11), 14853-14875.

McKinna, L. I., & Werdell, P. J. (2018). Approach for identifying optically shallow pixels when processing ocean-color imagery. *Optics express*, 26(22), A915-A928.

Mata, F. A. R. D. (2011). Abundância e distribuição temporal de *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857 (Mollusca, Bilvalvia) nos reservatórios de Itaipu e Jupia (PR).

Meerdink, S. K., Hook, S. J., Roberts, D. A., & Abbott, E. A. (2019). The ECOSTRESS spectral library version 1.0. *Remote Sensing of Environment*, 230, 111196.

Mobley, C. D. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic press.

Mobley, C. D. (2020). The Atmospheric Correction Problem. *Ocean Optics Web Book*. Recuperado de: <https://oceanopticsbook.info/view/remote-sensing/the-atmospheric-correction-problem>

Mobley, C. D., Werdell, J., Franz, B., Ahmad, Z., & Bailey, S. (2016). Atmospheric correction for satellite ocean color radiometry.

Moses, W. J., Bowles, J. H., Lucke, R. L., & Corson, M. R. (2012). Impact of signal-to-noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters. *Optics Express*, 20(4), 4309-4330.

Multitemp (2020). MAJA's Native Sentinel-2 format. Recuperado de: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/sentinel-2/majas-native-sentinel-2-format/#English>

Nechad, B., Ruddick, K. G., & Neukermans, G. (2009, September). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal

waters. In *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2009* (Vol. 7473, p. 74730H). International Society for Optics and Photonics.

Palmer, S. C., Hunter, P. D., Lankester, T., Hubbard, S., Spyrakos, E., Tyler, A. N., ... & Tóth, V. R. (2015). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment*, 157, 158-169.

Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Tenjo, C., Delegido, J., Urrego, P., Pena, R., ... & Moreno, J. (2018, July). Calibration and Validation of Algorithms for the Estimation of Chlorophyll-A in Inland Waters with Sentinel-2. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 9276-9279). IEEE.

Richter, R., Heege, T., Kiselev, V., & Schläpfer, D. (2014). Correction of ozone influence on TOA radiance. *International Journal of Remote Sensing*, 35(23), 8044-8056.

Richter, R., Louis, J., Müller-Wilm U. (2012). Algorithm Sentinel-2 MSI – Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document.S2PADATBD-0001, Issue 2.0.

Salama, M. S., & Verhoef, W. (2015). Two-stream remote sensing model for water quality mapping: 2SeaColor. *Remote sensing of Environment*, 157, 111-122.

Schmidt, W. (1915). Strahlung und Verdunstung an freien Wasserflächen; ein Beitrag zum Wärmehaushalt des Weltmeers und zum Wasserhaushalt der Erde. *Ann. Calender Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, 43, 111-124.

Schowengerdt, R. A. (2012). *Techniques for image processing and classifications in remote sensing*. Academic Press.

Sundarabalan, B., Shanmugam, P., & Ahn, Y. H. (2016). Modeling the underwater light field fluctuations in coastal oceanic waters: Validation with experimental data. *Ocean Science Journal*, 51(1), 67-86.

Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2018). Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote sensing of environment*, 216, 586-597.

Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2019). ACOLITE Python User Manual (QV - March 26, 2019). Recuperado de: [https://odnature.naturalsciences.be/downloads/remsem/acolite/acolite\\_manual\\_2019\\_0326.0.pdf](https://odnature.naturalsciences.be/downloads/remsem/acolite/acolite_manual_2019_0326.0.pdf)

Velini, E. D., Corrêa, M. R., Tanaka, R. H., Bravin, L. F., Antuniassi, U. R., Carvalho, F. T. D., & Galo, M. D. L. B. T. (2005). Avaliação operacional do controle mecânico de plantas aquáticas imersas no reservatório de Jupia. *Planta daninha*, 23(2), 277-285.

Vermote, E. F. T. D., Tanré, D., Deuzé, J. L., Herman, M., Morcrette, J. J., & Kotchenova, S. Y. (2006). Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV). *6S User Guide Version*, 3(2), 1-55.

Vigneshwaran, J., Shanmugam, P., & Gokul, E. A. (2015). Simulating the effects of inelastic scattering on upwelling radiance in coastal and inland waters: implications for hyperspectral remote sensing. *Current Science*, 903-914.

von Bismarck, J., Doerffer, R., & Fischer, J. (2011). Validation Report for MOMO with Raman Scattering Effects.

Vountas, M., Richter, A., Wittrock, F., & Burrows, J. P. (2003). Inelastic scattering in ocean water and its impact on trace gas retrievals from satellite data.

Westberry, T. K., Boss, E., & Lee, Z. (2013). Influence of Raman scattering on ocean color inversion models. *Applied optics*, 52(22), 5552-5561.

Zhang, P. (2018). Retrieval of the diffuse attenuation coefficient( $k_d$ ) from sentinel 2 using the 2seacolor model and  $k_d$ 's impacts on sensible heat flux over Namtso lake in Tibet, China.